

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RÔLE RÉGIONAL DES TOURBIÈRES
SUR LES EAUX SOUTERRAINES DE LA PARTIE BASSE DE LA ZONE BÉCANCOUR

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
KARINE AVARD

Mars 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je ne peux passer sous silence le travail exceptionnel de ma directrice, Marie Larocque. Par son soutien continu, son professionnalisme et son humanité, elle m'a enseigné à devenir une meilleure scientifique, mais aussi une meilleure personne. Ce sont des leçons qui me suivront toute ma vie.

Merci aux assistants de recherche, Sylvain Gagné et Léo Lysandre Tremblay, pour leur soutien et leur aide, pendant tout le projet.

Merci à mes partenaires de terrain Olivier Ferland, Diogo Barnetche, Mireille Pelletier, Frédérique Lemay-Borduas et à mes collègues et Rado Ranvonjarivelo et Miryane Ferlatte, les deux éditions de la gang de la Butte. Vous avez non seulement donné le meilleur de vous-même dans des conditions pas toujours faciles, mais vous avez aussi rendu ces deux années parfois chaotiques merveilleuses et inoubliables par votre présence, votre soutien, par vos discussions et vos fous rires. J'ai rencontré en vous de supers assistants et des amis précieux.

Merci à tous les gens qui m'ont aidé par leur savoir et leur expertise au cours de ce projet. Je pense à Michelle Laithier, Michel Lamothe, Michel Préda, Viorel Horoi, Stéphanie Pellerin et Martin Lavoie.

Je tiens également à remercier le MDDEP pour le financement ayant rendu ce projet de recherche possible. Je remercie ensuite les nombreux partenaires du projet (MRC de l'Érable, d'Arthabaska, de Nicolet-Yamaska, de Bécancour, le CRÉCQ, le Cégep de Thetford, l'AGTCQ, le GROBEC ainsi que la firme de géomatique CGQ).

En passant, un merci particulier à Anne de Vernal, qui a été la première à me donner le goût des études supérieures. Bien que nos chemins scientifiques se soient séparés, je te remercie pour ton soutien inconditionnel et ta passion contagieuse.

Finalement, je tiens à remercier mes parents, mes racines, mon château-fort, ainsi que mon amoureux, ma moitié, mon oasis. Vous avez su partager mes petites et grandes victoires avec enthousiasme, mes petites et grandes angoisses avec compassion. Vous avez cru en moi quand je doutais, m'avez soutenu quand je défailtais, m'avez écouté quand j'en avais besoin. Je vous dois beaucoup.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
RÉSUMÉ	xiv
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Problématique d'ensemble	2
1.2 État des connaissances	3
1.3 Objectif du mémoire	6
CHAPITRE 2	7
DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE	7
2.1 Introduction	8
2.2 Localisation et occupation du territoire	8
2.3 Géologie du ric	9
2.4 Géologie des dépôts meubles	9
2.5 Les tourbières dans la zone d'étude	13
CHAPITRE 3	15
CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE DES TOURBIÈRES	15
3.1 Introduction	16
3.2 Méthodologie utilisée	16
3.2.1 Sélection des sites étudiés	16
3.2.2 Contexte géomorphologique des tourbières	16
3.3 Résultat et discussion	18
3.3.1 Les sondages manuels	18
3.3.2 Profils géoradar	20
3.3.3 Analyse granulométrique	21
3.3.4 Dates basales	24
3.3.5 Indications pour les échanges aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude	25
CHAPITRE 4	29

PERTURBATIONS DES TOURBIÈRES DE LA RÉGION DE BÉCANCOUR, CENTRE-DU-QUÉBEC, ENTRE 1966 ET 2010.....	29
Mise en contexte	30
Résumé	31
4.1- Introduction	32
4.2.1- Localisation et occupation du territoire	35
4.2.2- Géologie de la région	35
4.2.3- Les tourbières	36
4.3.1- La photo-interprétation.....	37
4.3.2- Validation de la cartographie préliminaire	38
4.3.3- Analyse des perturbations	39
4.4.1- Superficies tourbeuses	41
4.4.2- Pertes entre 1966 – 2010	43
4.7- Références	47
CHAPITRE 5.....	51
CONNEXIONS AQUIFÈRE-TOURBIÈRE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE.....	51
5.1 Introduction.....	52
5.2 Méthodologie	52
5.2.1 Cartes piézométriques détaillées autour des tourbières étudiées	52
5.2.2 Calcul des flux échangés entre l'aquifère et les sites d'étude.....	53
5.2.3 Bilans hydriques	56
5.3 Résultats et discussion.....	58
5.3.1 Cartes piézométriques détaillées autour des tourbières étudiées	58
5.3.2 Flux aquifère-tourbière sur les neuf tourbières étudiées et bilans hydriques partiels	58
5.3.3 Flux aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude	65
CHAPITRE 6.....	69
CONCLUSION GÉNÉRALE	69
ANNEXE A.....	73
Localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	73

ANNEXE B	79
Coupes établies à l'aide des sondages manuels	79
ANNEXE C	89
Profils géoradar	89
ANNEXE D	99
Analyse aux rayons X	99
Méthodologie	100
ANNEXE E	113
Cartes piézométriques détaillées et segments utilisés pour le calcul des flux	113
ANNEXE F	119
Flux de Darcy pour chacune des neuf tourbières étudiées	119
RÉFÉRENCES	123

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Localisation de la zone d'étude	8
Figure 2-Géologie de la zone d'étude (modifiée de Globensky, 1987)	9
Figure 3-Géologie de surface de la partie basse de la zone Bécancour (simplifiée de Godbout et al., 2011)	10
Figure 4-Stratigraphie des Basses-Terres du Saint-Laurent (Lamothe, 1989).....	12
Figure 5-Localisation des tourbières de la partie basse de la zone Bécancour (données de la BNDDT, 2009)	14
Figure 6-Localisation des tourbières sur le profil topographique A-A'	14
Figure 7--Tourbières retenues comme sites d'étude	17
Figure 8-Épaisseurs de tourbe obtenues par géoradar et mesurées par sondages manuels sur l'ensemble des tourbières	20
Figure 9-Distribution granulométrique des échantillons	22
Figure 10-Distribution spatiale des types de dépôt minéral sous-jacent aux tourbières étudiées	23
Figure 11- Dates basales (années étalonnées) pour quatre tourbières de la partie basse de la zone Bécancour	24
Figure 12--Contexte géomorphologique des tourbières extrapolés à l'ensemble de la partie basse de la zone Bécancour	26
Figure 13- Localisation de la zone d'étude dans la région de Bécancour	34
Figure 14-Exemple de localisation des points de contrôle sur la Grande tourbière de Villeroy	39
Figure 15- Exemple de perturbations à la tourbière Sainte-Anastasie	40
Figure 16- Tourbières de la zone d'étude et degré de perturbation	42
Figure 17- Localisation et types de perturbations limitées	43
Figure 18-- Illustration de l'approche par segments (tirée de Rosenberry et LaBaugh, 2008)	54
Figure 19-Histogramme de fréquence des conductivités hydrauliques	55
Figure 20- Répartition spatiales des échanges aquifère-tourbière calculés avec l'équation de Darcy selon l'approche segmentée	61

Figure 21- Répartition spatiale de l'importance relative des flux horizontaux	62
Figure 22- Valeur absolue des flux échangés en fonction de la superficie de la tourbière	63
Figure 23- Valeur absolue des flux minimum échangés en fonction du périmètre de la tourbière	64
Figure 24- Valeur absolue des flux maximum échangés en fonction du périmètre de la tourbière	64
Figure 25- Tourbière de Blanford : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	74
Figure 26- Tourbière de Defoy : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	74
Figure 27- Tourbière de Francoeur : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	75
Figure 28- Tourbière de Lac Rose : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	75
Figure 29- Tourbière de Lemieux : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	76
Figure 30- Tourbière de Mer Bleue : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	76
Figure 31- Tourbière de Plessis : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	77
Figure 32- Tourbière de Saint-Sylvere : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	77
Figure 33- Tourbière de Villeroy : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X	78
Figure 34- Profil A-A' de la tourbière de Blanford	80
Figure 35- Profil B-B' de la tourbière de Blanford	80
Figure 36- Profil A-A' de la tourbière de Defoy	81
Figure 37- Profil B-B' de la tourbière de Defoy	81
Figure 38- Profil A-A' de la tourbière de Francoeur	82
Figure 39- Profil B-B' de la tourbière de Francoeur	82
Figure 40- Profil A-A' de la tourbière du Lac Rose	83

Figure 41-Profil B-B' de la tourbière du Lac Rose	83
Figure 42-Profil A-A' de la tourbière de Lemieux	84
Figure 43-Profil B-B' de la tourbière de Lemieux	84
Figure 44-Profil A-A' de la tourbière de Mer Bleue	85
Figure 45-Profil B-B' de la tourbière de Mer Bleue	85
Figure 46-Profil A-A' de la tourbière de Plessis	86
Figure 47-Profil B-B' de la tourbière de Plessis	86
Figure 48-Profil A-A' de la tourbière de Saint-Sylvère	87
Figure 49-Profil B-B' de la tourbière de Saint-Sylvère	87
Figure 50-Profil A-A' de la tourbière de Villeroy	88
Figure 51-Profil B-B' de la tourbière de Villeroy	88
Figure 52-Blanford, profil géoradar brut	90
Figure 53-Blanford, profil géoradar interprété	90
Figure 54-Defoy, profil géoradar brut	91
Figure 55-Defoy, profil géoradar interprété	91
Figure 56-Francoeur, profil géoradar brut	92
Figure 57-Francoeur, profil géoradar interprété	92
Figure 58-Lac Rose, profil géoradar brut	93
Figure 59-Lac Rose, profil géoradar interprété	93
Figure 60-Lemieux, profil géoradar brut	94
Figure 61-Lemieux, profil géoradar interprété	94
Figure 62-Mer Bleue, profil géoradar brut	95
Figure 63-Plessis, profil géoradar brut	96
Figure 64-Villeroy, profil géoradar brut	97
Figure 65-Villeroy, profil géoradar interprété	97
Figure 66-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, échantillon complet	101
Figure 67-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, particules grossières	101
Figure 68-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, sables, silts et argiles	102

Figure 69-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Blanford	114
Figure 70-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Defoy	114
Figure 71-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Francoeur	115
Figure 72-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Lac Rose	115
Figure 73-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Lemieux	116
Figure 74-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Mer Bleue	116
Figure 75-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Plessis	117
Figure 76-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Saint-Sylvère.....	117
Figure 77-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Villeroy	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-Épaisseurs, substrats et superficies des neuf sites d'étude.....	19
Tableau 2-Type de substrat, nombre de tourbières, aires totale et moyenne	27
Tableau 3- Superficies occupées en 2010 par les tourbières intactes, les tourbières avec perturbation limitée et les tourbières avec perturbation irréversible	44
Tableau 4-Moyenne logarithmique et moyenne équivalente des conductivités hydrauliques mesurées avec le perméamètre de Guelph.....	56
Tableau 5-Flux horizontaux (m ³ /j et %) de la pluie nette	59
Tableau 6-Bilan hydrique de la tourbière de Villeroy en avril 2012.....	65
Tableau 7-Données disponibles pour l'extrapolation des flux aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude	66
Tableau 8-Blanford, échantillon 278; résultats de la diffraction aux rayons X	103
Tableau 9-Defoy, échantillon 238; résultats de la diffraction aux rayons X	104
Tableau 10- Defoy, échantillon 257; résultats de la diffraction aux rayons X	104
Tableau 11- Francoeur, échantillon 140; résultats de la diffraction aux rayons X	105
Tableau 12-Francoeur, échantillon 145; résultats de la diffraction aux rayons X	105
Tableau 13- Lac Rose, échantillon 125; résultats de la diffraction aux rayons X.....	106
Tableau 14- Lac Rose, échantillon 132; résultats de la diffraction aux rayons X.....	106
Tableau 15-Lemieux, échantillon 327; résultats de la diffraction aux rayons X	107
Tableau 16- Lemieux, échantillon 331; résultats de la diffraction aux rayons X	107
Tableau 17- Mer Bleue, échantillon 160; résultats de la diffraction aux rayons X.....	108
Tableau 18- Mer Bleue, échantillon 210; résultats de la diffraction aux rayons X.....	108
Tableau 19-Plessis, échantillon 297; résultats de la diffraction aux rayons X	109
Tableau 20- Plessis, échantillon 303; résultats de la diffraction aux rayons X.....	109
Tableau 21-Saint-Sylvère, échantillon 59; résultats de la diffraction aux rayons X	110
Tableau 22- Saint-Sylvère, échantillon 65; résultats de la diffraction aux rayons X	110
Tableau 23- Villeroy, échantillon 76; résultats de la diffraction aux rayons X	111
Tableau 24-Villeroy, échantillon 92; résultats de la diffraction aux rayons X	111

RÉSUMÉ

À l'échelle de la planète, les milieux humides représentent entre 4 et 6 % de la superficie des terres émergées. Au Canada, cette proportion atteint près de 15%. Ces écosystèmes, dont l'hydrologie est étroitement liée à l'hydrogéologie de surface, sont fragiles et essentiels au maintien de la biodiversité. Le présent projet de maîtrise est réalisé dans le cadre d'un projet de caractérisation des eaux souterraines financé par le MDDEP et a pour objectif principal de comprendre le rôle des tourbières dans la dynamique de l'aquifère de la partie basse de la zone Bécancour. Une cartographie de l'ensemble des tourbières du territoire a été réalisée et leur degré de perturbation a été déterminé par photo-interprétation. La même démarche a été entreprise pour les photos aériennes de 1966, afin de connaître l'évolution des superficies dans le temps. Les résultats montrent qu'il y a 10 485 ha de tourbières intactes et 7 015 ha de tourbières légèrement perturbées. Les perturbations les plus fréquentes sont les canaux de drainage et les chemins forestiers. De plus, 5 433 ha de tourbière ont subi des perturbations irréversibles entre 1966 et 2010 sur la partie basse de la zone Bécancour, principalement en lien avec l'exploitation de la canneberge. Le contexte géomorphologique de neuf tourbières a été étudié au moyen de sondages manuels, de levés géophysiques par géoradar et d'analyses granulométriques. Les résultats montrent que les tourbières de la zone d'étude reposent toutes sur un substrat au moins partiellement perméable. Les substrats des tourbières à l'étude sont composés à 44% sur un substrat de sable éoliens et de till remanié, à 33% sur un dépôt de till remanié, à 11% sur un dépôt deltaïque et de till remanié et à 11% sur un dépôt marin et de till remanié. Les neuf tourbières étudiées ont une profondeur maximale variant entre 1,63 et 6,40 m et une profondeur moyenne entre 1,10 et 2,94 m. Les flux entrants et sortants des neuf sites ont été quantifiés à l'aide de l'approche segmentée de l'équation de Darcy. Les flux échangés entre les tourbières et l'aquifère se situent entre -1097 et 409 m³/j, cinq sites alimentant l'aquifère, trois sites recevant l'eau de l'aquifère et un n'ayant pas d'échange entre les milieux. Représentant en moyenne entre 4 et 11% des apports totaux de la tourbière, il a été possible d'extrapoler à l'ensemble des tourbières, et d'estimer les flux transitant entre les deux milieux à l'échelle de la zone d'étude. Le flux transitant de l'aquifère vers la tourbière est estimé entre 0,0033 et 0,0099 m³/s et le flux de la tourbière vers l'aquifère est estimé entre 0,0056 et 0,0168 m³/s. Ces proportions suggèrent que la tourbière joue un rôle tampon relativement limité. Localement, ces flux permettent de garder les niveaux piézométriques relativement stables en redistribuant l'eau au système du surface ou souterrain.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Problématique d'ensemble

Au Canada, 14 % des terres émergées sont des milieux humides. Au Québec, la superficie occupée par les tourbières est d'environ 12 % (Rochefort et al., 2011). La tourbière est définie comme un milieu à drainage variable où le processus d'accumulation organique prévaut sur le processus de décomposition et d'humification, peu importe la composition organique des restes botaniques (Payette et Rochefort, 2001). Les tourbières filtrent et purifient les eaux de surface en plus de réduire l'érosion et les risques d'inondation. Elles atténuent les périodes de sécheresse en approvisionnant la nappe d'eau souterraine et les rivières en période de basses eaux. De plus, les tourbières constituent des écosystèmes uniques qui sont nécessaires pour plusieurs espèces fauniques et floristiques et donc pour le maintien de la biodiversité (Canards Illimités Canada, 2006).

Les tourbières sont des milieux fragiles qui subissent des pressions diverses. Le remblaiement, le drainage et le pompage menacent leur équilibre, tandis que l'augmentation de l'évaporation découlant du réchauffement climatique pourrait éventuellement augmenter la décomposition et la densification des dépôts organiques (Whittington et Price, 2006). Dans certaines régions, comme par exemple dans le Centre-du-Québec, les pressions agricoles sont croissantes que ce soit pour la culture maraîchère ou la culture de la canneberge. Pour certaines cannebergières les plus anciennes, la tourbe drainée est utilisée directement pour la culture tandis que pour les cannebergières plus récentes, la culture est réalisée en bordure des tourbières, celles-ci étant utilisées comme réservoirs pour l'alimentation en eau (Julien Caron, 2009).

Il est largement accepté que les milieux humides ne sont pas isolés des systèmes hydrologiques et hydrogéologiques environnants (eg : Devito et al., 1997; Ferone et Devito, 2004). Elles sont donc sensibles aux modifications des quantités d'eau souterraine disponibles, des moments et de la durée de l'approvisionnement (Glaser et al., 1981; Siegel, 1983; Siegel et Glaser, 1987). Toutefois, l'ampleur et la direction des échanges entre ces milieux ne sont pas bien compris, et le rôle des tourbières dans un aquifère régional n'est pas connu. Dans les faits, les études sur la disponibilité et la qualité de l'eau souterraine sont presque exclusivement axées sur les besoins humains, que ce soit pour la consommation, l'irrigation ou l'usage industriel de l'eau. Peu de données existent au Canada et au Québec sur

la vulnérabilité des écosystèmes qui ont un lien direct avec l'eau souterraine (*Groundwater dependent ecosystems, GDE*), contrairement à certains autres pays comme l'Australie (Environment Australia, 1994), l'Afrique du sud (DWAF, 1997) ou l'Union Européenne (Union Européenne, 2000).

1.2 État des connaissances

Il existe deux principaux types d'écosystèmes tourbeux. La tourbière ombrotrophe (ou bog) est généralement légèrement surélevée et est alimentée par les précipitations. Le pH de l'eau d'une tourbière ombrotrophe est généralement faible ($< 4,2$) (Glaser et al., 1981 ; Ingram et Gore, 1983). Le manque de nutriments et l'acidité de l'eau engendrent une faible diversité floristique. La tourbière minérotrophe (ou fen) a une morphologie concave ou plane. L'eau de pH plus élevé ($> 4,2$) contient plus de nutriments en solution, ce qui entraîne une plus grande richesse floristique (Glaser et al., 1981 ; Ingram et Gore, 1983). La stratification d'une tourbière peut être simplifiée conceptuellement en deux couches distinctes (Ingram, 1982), possédant des propriétés hydrauliques différentes. L'acrotelme est la couche qui compose les 50 cm supérieurs de la tourbe. Le matériel organique y est peu décomposé et la conductivité hydraulique est relativement élevée (10^{-2} m s^{-1}). C'est également dans cette couche que fluctuent le niveau de la nappe phréatique (Ivanov, 1981 ; Hoag et Price, 1995). La couche située entre l'acrotelme et le substrat minéral est appelée catotelme. Dans cette couche, la matière organique est à un stade de décomposition plus avancé et la conductivité hydraulique est généralement plus faible, de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-8} m s^{-1} . Le catotelme est saturé en permanence et est anoxique (Chason et Siegel, 1986). Le catotelme peut également être stratifié, en fonction du degré de décomposition ou de la composition initiale de la matière organique. La tourbe est également un milieu anisotrope, où la conductivité hydraulique horizontale est souvent plus élevée que la conductivité hydraulique verticale (Hoag et Price, 1995 ; Ours et al., 1997).

La conductivité hydraulique de la tourbe est une caractéristique déterminante pour l'écoulement de l'eau dans la tourbière et les échanges avec les dépôts meubles inorganiques voisins (Ours et al., 1997 ; Reeve et al., 1999). La faible conductivité hydraulique verticale du catotelme a amené plusieurs chercheurs à assumer que l'écoulement verticale n'était pas

significatif ou pouvait même être nul (Toth, 1963 ; Freeze and Cherry, 1979). Se basant sur cette hypothèse, certains auteurs (Ingram, 1982; Ingram et Gore, 1983) ont proposé un modèle d'écoulement principalement latéral de l'eau dans la tourbe. Ce modèle propose qu'il n'y ait pas d'échange vertical d'eau entre le matériel tourbeux profond et le substrat minéral.

Lorsque les dépôts organiques et inorganiques ont la même conductivité hydraulique, il a été démontré qu'une alimentation locale de la tourbière par des flux verticaux provenant de l'aquifère sous-jacent peut se produire (Siegel, 1983 ; Siegel et Glaser, 1987). Dans ces cas, les tourbières peuvent devenir des zones de décharge d'eau souterraine, minéralisée au cours de son séjour dans la roche ou dans les dépôts meubles. L'ampleur des échanges avec l'aquifère sous-jacent peut changer au cours d'une année hydrologique et même s'inverser selon les variations de précipitations et d'évapotranspiration locales et selon la dynamique de l'aquifère lui-même (Romanowicz et al., 1994; Siegel et al., 1995). Les inversions de directions d'écoulement peuvent être encore plus fréquentes dans les petites tourbières alimentées par un aquifère très local (Devito et al., 1997). Les tourbières peuvent donc avoir des fonctions hydrologiques variées, soit étant alimentées par l'aquifère, soit se déchargeant vers celui-ci, latéralement ou verticalement, soit en étant complètement isolées de l'eau souterraine (Hemond, 1980). Les paramètres qui dictent une ou l'autre situation sont encore très peu connus et il est difficile de caractériser les échanges d'eau entre une tourbière et l'aquifère voisin (Dempster et al., 2006). Le contexte géomorphologique dans lequel se trouve une tourbière (Devito et al., 2000 ; Todd et al., 2006) ainsi que sa position dans le système hydrogéologique (Shedlock et al., 1993) influencent fortement la forme et l'intensité des connections hydrologiques et donc les réponses aux perturbations (Bedford, 1999; Devito et al., 2000). Dans le nord-est de l'Amérique du Nord, la localisation des tourbières et leurs fonctions hydrologiques sont fortement influencées par les dépôts quaternaires (O'Brien, 1988). C'est pourquoi la connaissance du contexte géomorphologique est nécessaire à la compréhension du rôle hydrogéologique d'une tourbière.

La plupart des études sur les échanges aquifère-tourbière rapportées dans la littérature ont visé la compréhension précise de systèmes locaux, nécessitant une instrumentation dense et une analyse complexe. Très peu d'études ont été menées afin de déterminer les directions et les flux entre les tourbières et les eaux souterraines à l'échelle régionale. Des techniques

simples existent pourtant pour calculer les interactions entre des réservoirs de surface et l'eau souterraine. L'application de la loi de Darcy est un exemple pouvant permettre de calculer ces échanges (cf. Rosenberry et LaBaugh, 2008) et peut être utile pour calculer les échanges souterrains entre un aquifère et une tourbière (Todd et al., 2006 ; van der Kamp et Hayashi, 2009).

Au cours du dernier siècle, le sud du Québec a connu une augmentation de sa population et une densification de ses activités agricoles (MRNF, 2007). Bien que les tourbières soient nombreuses dans l'ensemble du Québec et que la plupart soient toujours exemptes de perturbations (Poulin et al., 2004), celles situées dans la vallée du Saint-Laurent sont soumises à de fortes pressions anthropiques. Certains estiment même que 80 % des milieux humides, notamment des tourbières, auraient disparu depuis la venue des premiers colons européens, bien qu'aucune donnée n'existe sur les pertes réelles (Payette et Rochefort, 2001). Au cours des dernières décennies, les principales causes de disparition ou de dégradation des tourbières dans le sud du Québec furent l'agriculture, les activités forestières et l'extraction de la tourbe à des fins horticoles (Poulin et al., 2004). D'autres pressions comme le remblaiement, le drainage, le prélèvement d'eau souterraine ou les changements climatiques (Whittington et Price, 2006) peuvent également menacer leur équilibre hydrologique. Afin de dresser un portrait complet de la situation, il est donc important de connaître l'évolution spatio-temporelle des tourbières et de déterminer le type de perturbation qui les affecte actuellement.

Dans le Centre-du-Québec, une importante proportion du territoire est occupée par les tourbières. Sachant qu'elles ne sont pas isolées de l'hydrologie et de l'hydrogéologie régionale, il apparaît important de connaître leurs caractéristiques et leur rôle. Le présent projet s'intègre dans le «*Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour*» financé par le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

1.3 Objectif du mémoire

L'objectif principal de ce mémoire de maîtrise est de déterminer le rôle régional des tourbières dans les écoulements souterrains de la partie basse de la zone Bécancour. La zone d'étude est d'abord décrite dans le chapitre II. Dans le chapitre III, les perturbations des tourbières de la région de Bécancour entre 1966 et 2010 sont décrites. Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article publié dans la revue *Le Naturaliste canadien* (Avard et al., 2013). Les contextes géomorphologiques dans lesquels se trouvent neuf tourbières plus spécifiquement ciblées dans la zone d'étude sont ensuite étudiés au chapitre IV. Ce chapitre a fait l'objet d'une communication orale à la conférence annuelle de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues qui s'est tenue à Québec en août 2011 (voir Avard et Larocque, 2011, pour le résumé étendu de cette présentation). Le chapitre V est consacré à la quantification des échanges aquifère de surface-tourbière sur les neuf tourbières. Les résultats du chapitre V ont fait l'objet d'une communication orale à l'occasion du colloque «Les connaissances sur les eaux souterraines régionales: acquisition et transfert» de l'Acfas les 7 et 8 mai 2012 à Montréal. Le mémoire se termine par une conclusion générale au chapitre VI.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1 Introduction

La zone d'étude est décrite dans ce chapitre. D'abord, la localisation de la partie basse de la zone Bécancour et l'occupation de son territoire sont présentées. Ensuite, la géologie régionale du roc, les dépôts de surface et la stratigraphie régionale sont discutés. Finalement, les tourbières de la zone d'étude et les neuf tourbières ciblées plus spécifiquement dans ce projet sont localisées.

2.2 Localisation et occupation du territoire

Située dans la région Centre-du-Québec, la partie basse de la zone Bécancour draine une superficie de 2 856 km², sur la rive sud du Saint-Laurent entre Montréal et Québec (figure 1). La rivière Bécancour prend sa source dans les Appalaches pour se jeter 196 km plus loin dans le fleuve Saint-Laurent. Ce territoire supporte une population d'environ 52 000 habitants. Près de la totalité de la zone Bécancour est de tenure privée (99%). L'utilisation du territoire est principalement forestière (58%) et agricole (39%) tandis que le milieu bâti occupe 3% de la superficie du territoire (Morin et Boulanger, 2005).

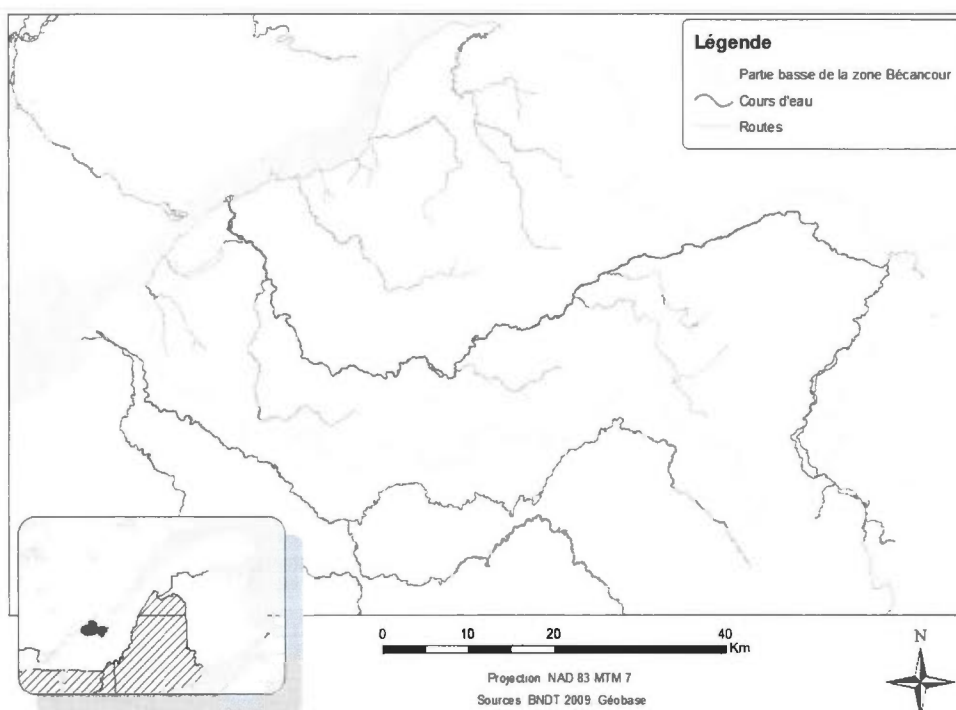


Figure 1- Localisation de la zone d'étude

2.3 Géologie du ric

La partie basse de la zone Bécancour chevauche deux régions physiographiques : les Appalaches dans la partie amont et les Basses-Terres du Saint-Laurent dans la partie aval. Ces régions sont séparées par la faille de Logan (St-Julien et Hubert, 1975).

Les Appalaches sont formées de deux ensembles de roches ophiolitiques correspondant à deux phases de déformations consécutives. La première, résultat de l'orogénèse taconienne, est formée de roches sédimentaires et ignées fortement déformées. La deuxième est également formée de roches sédimentaires et ignées, mais sont moins déformées. Elles ont été mise en place par l'orogénèse acadienne (Tremblay et Pinet, 1975). Les schistes argileux et ardoisiers, les grès et le calcaire sont les roches les plus souvent rencontrées (Tremblay, 1995). La géologie de la zone d'étude est présentée à la figure 2.

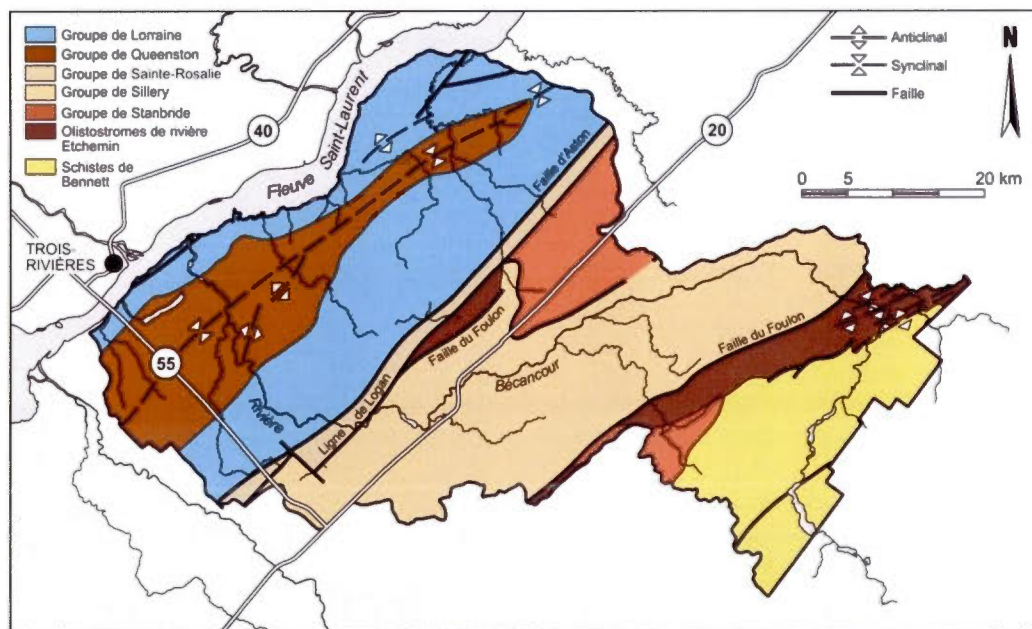


Figure 2-Géologie de la zone d'étude (modifiée de Globensky, 1987)

2.4 Géologie des dépôts meubles

Godbout et al., (2011) ont récemment publié une nouvelle carte des dépôts meubles pour la zone d'étude (figure 3). L'épaisseur des dépôts meubles s'amenuisent progressivement depuis

la faille de Logan jusqu'aux sommets appalachiens (Godbout et al., 2011). La partie amont de la zone est principalement recouverte par 1 à 2 m de till de Gentilly (Gadd, 1955), d'où le roc affleure sporadiquement. Le till de Gentilly est gris et a une faible teneur en silt, ce qui le rend perméable. Sa composante sableuse est principalement composée de quartz et de feldspaths. Les clastes trouvés dans ce till sont principalement des roches ignées granitiques ou gneissiques (Gadd, 1955).

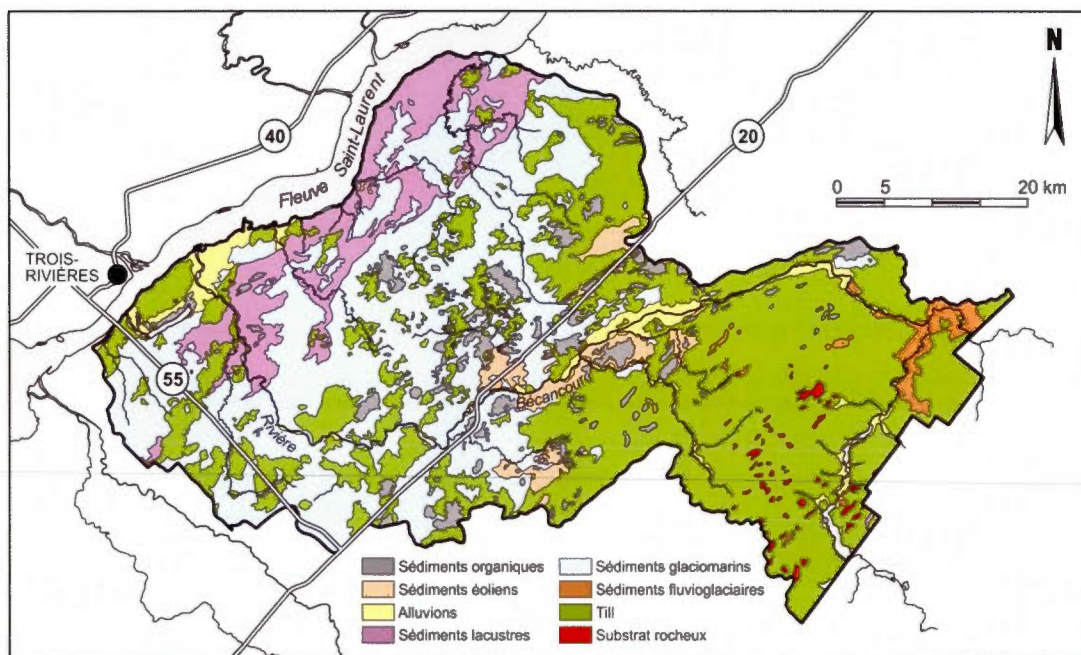


Figure 3-Géologie de surface de la partie basse de la zone Bécancour (simplifiée de Godbout et al., 2011)

La partie aval de la zone est principalement recouverte par des argiles de la Mer de Champlain. Ces dépôts argileux, qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, se sont déposés dans les parties les plus basses des Basses-Terres du Saint-Laurent et dans les vallées réentrantes (Gadd, 1955). Composés de quartz avec un peu de mica, ces dépôts possèdent les caractéristiques physiques de l'argile. Toutefois leur analyse granulométrique indique une proportion de 64% de silt et de 36% d'argile ($< 2 \mu\text{m}$). Il s'agit donc de silt argileux de couleur bleue (Peck et al., 1951). Au centre de la zone, des dépôts de till, remaniés par les

eaux de la Mer de Champlain et lessivés de leurs particules fines, affleurent sporadiquement en amont et de plus en plus régulièrement vers l'aval.

Des dépôts de sables éoliens forment un corridor nord-sud au centre de la zone. Composés principalement de quartz, ces dunes ont généralement une superficie inférieure à 2 km². Elles sont bordées d'arêtes subparallèles et les zones inter dunes sont comblées par du matériel organique tourbeux. Ces tourbières se sont mises en place postérieurement à la formation des dunes (Filion, 1987). Des dates basales de tourbe sont présentées au chapitre IV. Parallèlement au fleuve Saint-Laurent et jusqu'à une altitude d'un peu plus de 50 m, on trouve des cordons littoraux formés de sable et de graviers bien triés (Gadd, 1955).

La stratigraphie des dépôts a été définie par Gadd (1955) et modifiée ensuite par Lamothe (1989) (figure 4). La colonne stratigraphique est formée de trois unités glaciaires et de trois épisodes de dépôts interglaciaires et interstadias. Les dépôts de surface sont principalement caractérisés par la dernière séquence glaciaire. L'âge du till inférieur, le Till de Bécancour, n'est pas exactement défini mais daterait d'une glaciation pré-sangamonienne. Suivant ce till, des rythmites se sont déposées dans un environnement glacio-lacustre datant de 128 000 ans BP lors de l'épisode de la mer de Cartier (Lamothe, 1989). Une séquence de dépôts non glaciaires, les sables de Lotbinière, témoigne du rétablissement du drainage suite au retrait progressif du glacier. Cette unité serait la dernière déposée lors du Sangamonien.

Les varves du Cap Lévrard reposent directement sur les Sables de Lotbinière. Ces dépôts argileux représentent la première unité litho-stratigraphique wisconsinienne. Une glaciation au Wisconsinien inférieur est responsable du dépôt du till de Lévrard, mis en place entre 90 000 et 70 000 BP (Lamothe, 1989). Les sédiments de St-Pierre, correspondant à un interstade, comprennent les rythmites du St-Maurice et les sables des Vieilles-Forges. Les rythmites du St-Maurice proviennent d'une sédimentation d'environ 1 000 ans de dépôts fins dans le Lac de la Vérendrye. Les sables des Vieilles-Forges comprennent des dépôts lacustre, deltaïques et finalement proglaciaires, indiquant le retour vers une glaciation (Clet et Occhietti, 1996).

La dernière avancée glaciaire, datant de 30 000 ans, a mis en place de Till de Gentilly, l'unité glaciaire supérieure, précédée de varves grises. Suite à la déglaciation, l'invasion de la région

des Basses-Terres du Saint-Laurent par la Mer de Champlain a laissé une épaisse couche de dépôts silto-argileux. Avec le relèvement isostatique, de cordons littoraux se sont déposés sous le niveau maximal de la mer et au dessus du niveau actuel du Saint-Laurent. Ces cordons littoraux ont été créés lors de périodes de stabilisation de la baisse du niveau de l'eau entre 11 300 et 9 800 BP (Ouimet et Lamothe, 2011).

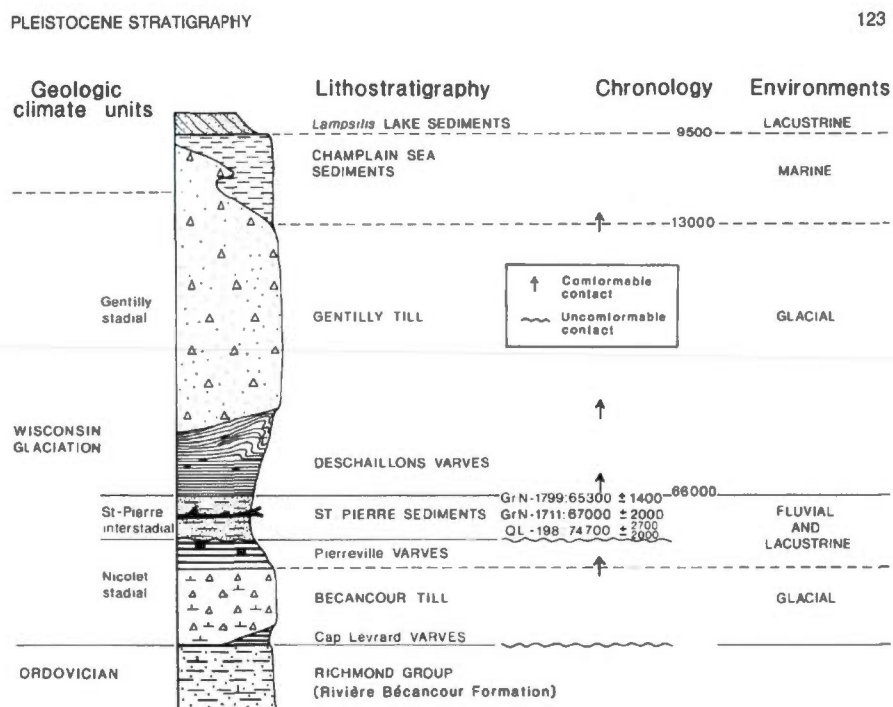


Figure 4-Stratigraphie des Basses-Terres du Saint-Laurent (Lamothe, 1989)

C'est à ce moment que débute le comblement des dépressions et chenaux abandonnés, du sud-ouest vers le nord-ouest, suivant la direction du retrait glaciaire. Finalement, des dépôts sableux pris en charge par des processus éoliens ont formé des dunes entre les rivières Nicolet et Chaudière. Ces dunes paraboliques ont été formées par l'action d'un vent dominant vers le nord-est contrôlé par la déglaciation au début de l'Holocène. Les sables qui les

composent sont d'origine marine ou deltaïque (Filion, 1987). Des alluvions se sont également déposés en bordure des rivières actuelles (Lamothe et al., 2011).

Il est à noter qu'un modèle hydrostratigraphique 3D pour l'ensemble de la zone d'étude est présentement en développement dans le cadre du *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour*. Ce modèle permettra de comprendre la succession des couches sédimentaires à l'ensemble de la zone d'étude.

2.5 Les tourbières dans la zone d'étude

Selon Muller et al., (2003), les tourbières du sud du Québec se sont mises en place par comblement de dépressions humides à partir du retrait de la Mer de Champlain. Le processus de comblement commence par un étang, puis évolue vers un marais et vers une tourbière minérotrophe. S'accumulant en épaisseur, la végétation à la surface de la tourbière s'isole de l'aquifère, devenant de type ombrotrophe (Dempster et al., 2006). Le développement de la tourbière peut également se faire par paludification, i.e. par l'accumulation progressive de matière organique à partir d'un sol minéral sous des conditions climatiques humides. L'accumulation de matière organique fut rapide au début de l'Holocène pour ensuite ralentir au milieu et à la fin de cette période (Muller et al., 2003).

Les tourbières illustrées sur la figure 5 sont celles de la Base Nationale de Données Topographique (BNDT, 2009). Elles sont illustrées à titre indicatif seulement et ne représentent pas nécessairement les tourbières réellement présentes dans la zone d'étude (le chapitre III présentera la distribution spatiale actuelle des tourbières). Sur la zone d'étude, les tourbières sont principalement situées dans un corridor nord-est sud-ouest au centre de la zone, entre 80 et 130 m d'altitude, à partir du piedmont appalachien (figure 6). Selon l'estimation de Canards Illimités Canada (2006), il y a 26 105 ha de milieux humides dans la partie basse de la zone Bécancour, dont 80% (20 775 ha) seraient des tourbières. Selon ces chiffres, les milieux humides représenteraient 9,1 % de la superficie totale de la zone dont 7,3% sont des tourbières (la superficie exacte de la zone d'étude occupée par les tourbières sera précisée dans le chapitre suivant). Les tourbières sur la zone d'étude sont principalement

de type ombrotrophe (alimentées seulement par les précipitations), arborées ou arbustives (Buteau 1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b).

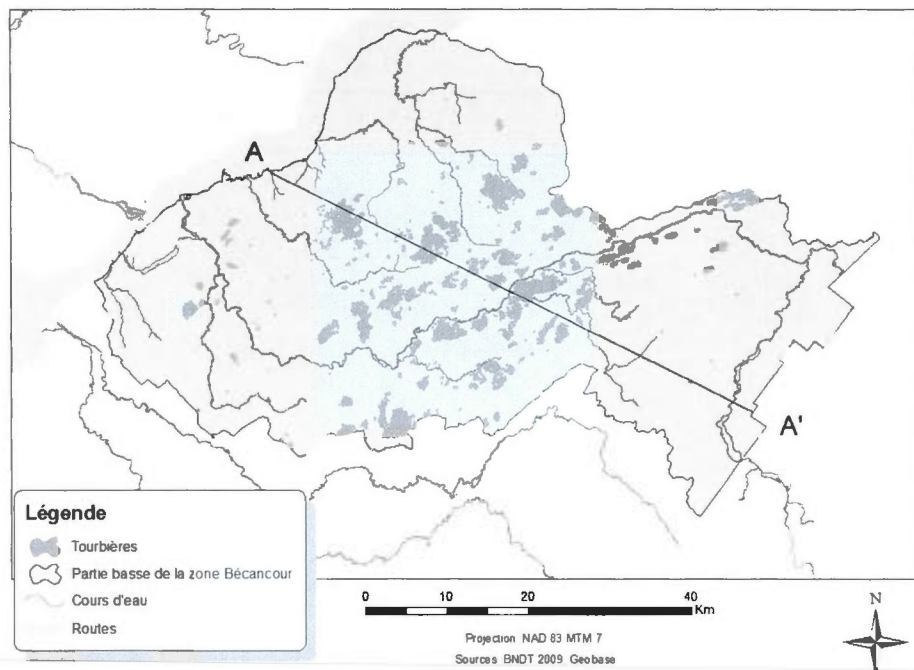


Figure 5-Localisation des tourbières de la partie basse de la zone Bécancour (données de la BNDT, 2009)

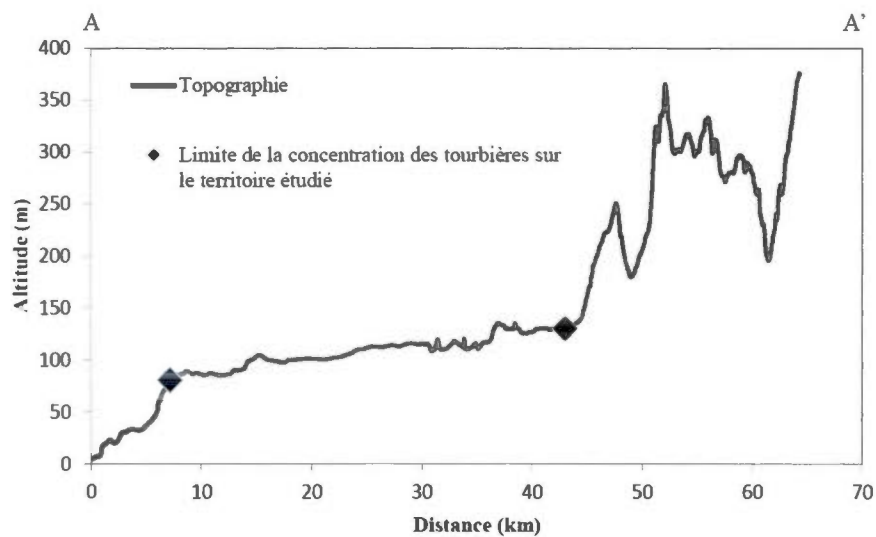


Figure 6-Localisation des tourbières sur le profil topographique A-A'

CHAPITRE 3

CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE DES TOURBIÈRES

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de décrire le contexte géomorphologique dans lequel se trouvent les tourbières de la partie basse de la zone Bécancour. La méthodologie utilisée pour réaliser les travaux de terrain est d'abord présentée. Les résultats sont ensuite décrits et interprétés dans le contexte régional. Cette partie du mémoire servira de base à l'analyse du rôle des tourbières sur l'aquifère de la zone basse de la rivière Bécancour, présentée dans le chapitre V. Les résultats de ce chapitre ont été présentés à la conférence annuelle de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues qui s'est tenue à Québec en août 2011 (Avard et Larocque, 2011).

3.2 Méthodologie utilisée

3.2.1 Sélection des sites étudiés

La sélection des neuf tourbières étudiées plus spécifiquement dans le cadre de ce projet a été basée sur les travaux de Buteau (1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b). Le premier critère de sélection de ces neuf tourbières a été le niveau limité de perturbation. Puis, parmi les sites non perturbés ou légèrement perturbés, la sélection a été raffinée de manière à choisir des sites représentatifs des différents contextes géomorphologiques sous-jacents aux tourbières telles qu'identifiées par Buteau (1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b). La répartition spatiale des sites au sein du gradient topographique de la région a également été prise en compte. Finalement, les plus grands sites respectant les critères précédents ont été retenus. Les neuf tourbières retenues sont celles de Blanford, Defoy, Francoeur, Lac Rose, Lemieux, Mer Bleue, Plessis, Saint-Sylvère et Villeroy (figure 7).

3.2.2 Contexte géomorphologique des tourbières

Pour chacune des neuf tourbières sélectionnées, à partir de deux profils semi-perpendiculaires A-A' et B-B', la profondeur des dépôts organiques de chaque profil a été mesurée manuellement. Les cinq premiers profils sondés (soient Saint-Sylvère A-A', B-B', Villeroy A-A', B-B' ainsi que Lac Rose A-A') ont été réalisés avec un pas d'échantillonnage de 200 m. Suite à l'analyse graphique des résultats, le pas de sondage a été réduit à 100 m pour obtenir plus de précision. Les 13 autres profils ont donc été sondés avec un pas de 100 m (Annexe A 1). Un échantillon du dépôt minéral sous-jacent a été prélevé avec une sonde Hiller à tous

les sondages. Un échantillon sur deux, d'un volume minimal de 5 cm³, a été mis en sac pour analyses ultérieures.

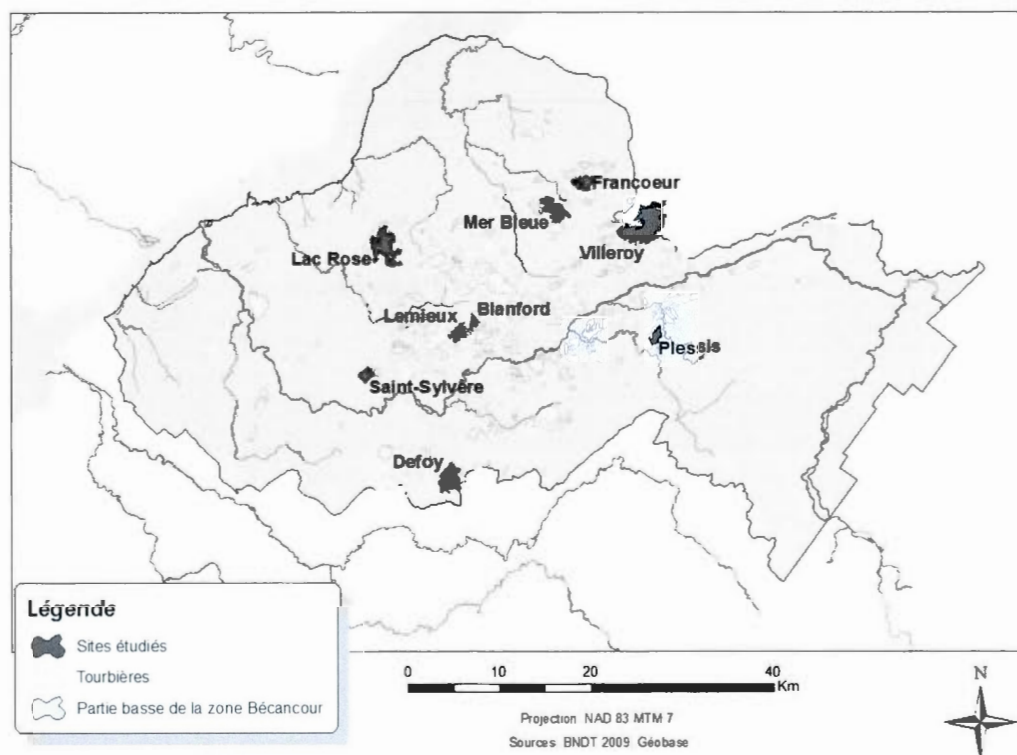


Figure 7--Tourbières retenues comme sites d'étude

Sur le terrain, les échantillons récoltés ont été analysés visuellement pour identifier préliminairement la composition du minéral sous-jacent. Deux échantillons minéraux par tourbière ont été sélectionnés pour leur analyse granulométrique. Ils ont été séchés à l'air pendant 48 heures, avant d'être pesés et tamisés à l'aide de tamis de 250 et 63 μm . Les particules de taille supérieure à 250 μm sont classées comme des graviers tandis que celles entre 250 et 63 μm sont classées comme des sables et celles plus petites que 63 μm sont classées comme des silts ou des argiles. Le pourcentage de leur masse totale de chacune des classes a été calculé.

Les deux échantillons sélectionnés pour l'analyse granulométrique ont également été analysés en diffraction des rayons X dans les laboratoires de l'UQAM. L'objectif était de tenter de distinguer l'origine des minéraux contenus dans les échantillons. L'emplacement de leur site

d'échantillonnage est illustré à l'Annexe A, et les résultats sont présentés à l'Annexe D. Les résultats ne seront pas discutés dans ce mémoire.

Un profil par site a été relevé au moyen d'un géoradar, afin de préciser les profondeurs de tourbe entre les stations de mesure des profondeurs. Ces relevés ont été faits au moyen d'un géoradar Pulse Ekko Pro, avec une antenne de longueur d'onde 100 MHz et un pas d'échantillonnage de 1 m. La vitesse de propagation des ondes dans la tourbe a été identifiée à partir de la littérature à $0,038 \text{ m ns}^{-1}$ (Slater et Reeves, 2002 ; Rosa et al., 2009). La localisation des profils effectués avec le géoradar est illustrée aux figures de l'Annexe 1. Autant que possible, les levés géoradar ont été faits exactement au même endroit que les échantillonnages manuels. Pour certaines tourbières (Francoeur et Lac Rose), les deux levés sont légèrement décalés (Blandford, Defoy, Lemieux et Villeroi) et pour d'autres, les levés ont été réalisés sur des profils complètement différents (Mer Bleue, Plessis et Saint-Sylvère).

Finalement, la datation ^{14}C du début de l'entourbement pour quatre des neuf sites (Lac Rose, Mer Bleue, Saint-Sylvère et Villeroi) a été réalisée dans le but de situer leur développement dans le temps et donc de les situer dans la stratigraphie régionale. Cette information est pertinente pour comprendre les échanges possibles entre les dépôts meubles sous-jacents et les dépôts organiques. Les dates ont été obtenues par datation ^{14}C SMA d'échantillons prélevés à la base des dépôts organiques au moyen d'un carottier Russe dans les secteurs les plus épais des dépôts organiques. L'échantillonnage et les datations ont été réalisés avec la collaboration de Martin Lavoie du Centre d'études nordiques de l'Université Laval.

3.3 Résultat et discussion

3.3.1 Les sondages manuels

L'épaisseur maximale de la tourbe dans les neuf sites étudiés varie entre 1,63 et 6,40 m, et est en moyenne de 3,18 m (tableau 1). L'épaisseur moyenne des dépôts tourbeux varie entre 1,10 et 2,94 m. La superficie des sites, déterminée au chapitre précédent, varie entre 71 et 1197 ha ; la moyenne est de 367 ha et la médiane de 150 ha. Les profils obtenus avec les sondages manuels sont présentés à l'Annexe B. Ces coupes montrent que les épaisseurs moyennes et maximales de tourbe relativement semblables d'un site à l'autre, sauf pour la tourbières de Saint-Sylvère, qui est celle où la tourbe est la plus épaisse. Les profondeurs moyennes et

maximales obtenues sont du même ordre de grandeur à celles obtenues par Buteau (1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b) pour ces mêmes sites.

Tableau 1-Épaisseurs, substrats et superficies des neuf sites d'étude

Tourbière	Épaisseur maximale de tourbe (m)	Épaisseur moyenne de tourbe (m)	Dépôt basal	Superficie de la tourbière (ha)
Blanford	3,01	1,84	Sable	71
Defoy	3,73	1,86	Sable	458
Francoeur	2,38	1,34	Sable	200
Lac Rose	2,60	1,62	Sable	665
Lemieux	3,20	1,61	Sable	155
Mer Bleue	2,00	1,20	Sable	360
Plessis	1,63	1,10	Sable	129
Saint-Sylvère	6,40	2,94	Argile	146
Villeroy	3,70	1,83	Sable	1197

L'observation visuelle des échantillons de minéraux effectués en plusieurs points sur chaque profil montre une hétérogénéité du substrat, composé de graviers, de sables, de silts et d'argile, la texture dominante étant le sable (voir figures de l'Annexe B). Huit des neuf tourbières se sont développées sur un substrat principalement sableux perméable. Ces résultats sont également similaires à ceux obtenus par Buteau (1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b). La tourbière de Saint-Sylvère repose sur un substrat principalement silto-argileux, même si du sable a été identifié par endroits. La présence de sable sous la majorité des sites étudiés indique que ceux-ci peuvent potentiellement avoir des échanges hydrauliques avec l'aquifère voisin.

3.3.2 Profils géoradar

Les profils géoradar bruts et les profils interprétés sont présentés à l'Annexe C (à l'exception de ceux de Saint-Sylvère qui n'ont pas donné de résultats probants; seuls les profils bruts de Mer Bleue et de Plessis sont présentés). Dans la majorité des tourbières, le géoradar a permis d'identifier l'interface entre les dépôts organiques et les dépôts inorganiques. Sur le site de la tourbière de Saint-Sylvère, il a été impossible d'obtenir des résultats concluants, possiblement en raison de la nature argileuse du dépôt, puisque les argiles marines de la mer de Champlain ont une salinité trop élevée qui entrave le signal.

La figure 8 montre que les épaisseurs de tourbe estimées avec le géoradar sont similaires à celles mesurées par sondage manuel. Les mesures manuelles utilisées pour cette comparaison sont celles des tourbières de Francoeur et Lac Rose (superposition quasi-exacte des mesures manuelles et géoradar), de même que celles des tourbières de Blandford, Defoy, Lemieux et Villeroy (léger décalage entre les mesures manuelles et par géoradar).

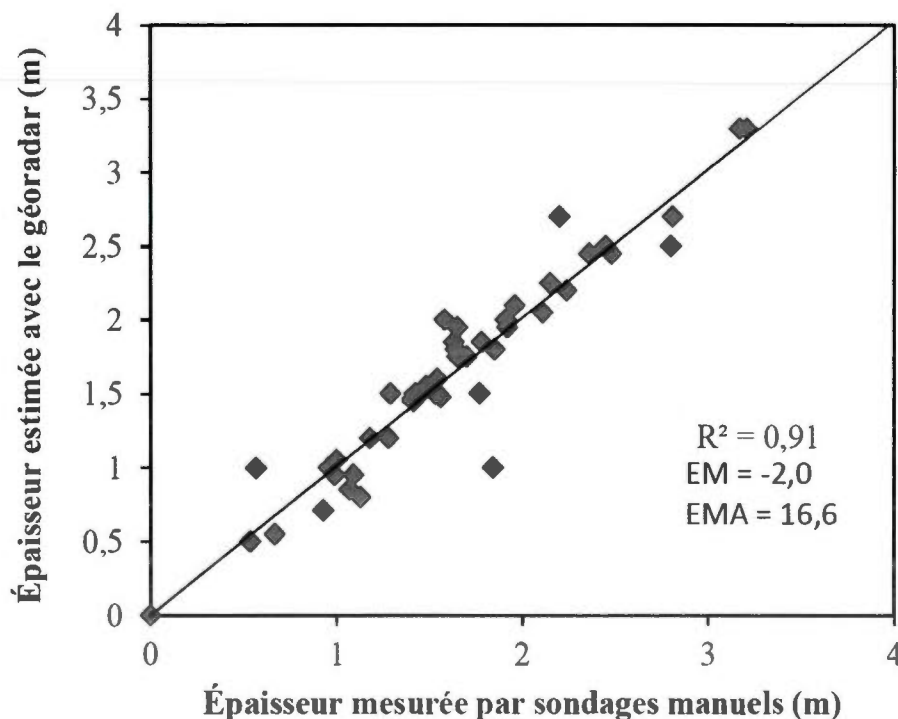


Figure 8-Épaisseurs de tourbe obtenues par géoradar et mesurées par sondages manuels sur l'ensemble des tourbières

Les mesures manuelles des profils de Mer Bleue, Plessis et Saint-Sylvère n'ayant pas été réalisées au même endroit que les levés géoradar, elles n'ont pas été prises en compte. L'erreur moyenne sur les valeurs mesurées est de -2,0 cm, l'erreur moyenne absolue est de 16,6 cm et le r^2 est de 0,91. Ces résultats sont similaires à ceux rapportées par Rosa et al. (2009) pour les tourbières de Lanoraie et de Covey Hill.

Les différences entre les sondages manuels et les résultats des profils géoradar peuvent découler de plusieurs facteurs. D'abord, la variabilité latérale des profondeurs s'est révélée importante lors des sondages manuels (décimétrique dans un rayon inférieur à 1 m) puisque les sondages manuels et les profils géoradar n'ont pas été réalisés au même moment. Compte tenu de la précision (+/- 8 m) des appareils de localisation GPS, les mesures ne sont pas toujours parfaitement superposées.

L'analyse par géoradar a apporté une couverture spatiale plus grande des épaisseurs de tourbe. Les résultats permettent d'illustrer la variabilité topographique de la surface minérale probablement mise en place à la faveur d'écoulements de surface, avant une phase d'isolement de l'eau dans des cuvettes qui se sont peu à peu comblées. Les résultats du GPR présentés ici ne permettent pas de reconstituer l'épaisseur totale du minéral sous-jacent aux tourbières. Une thèse de doctorat en cours (cf. travaux de Rado Ravonjariavelo) apportera des précisions à cet égard pour quatre des neuf tourbières étudiées ici.

3.3.3 Analyse granulométrique

Les résultats des analyses granulométriques et des analyses semi-quantitatives sont disponibles à l'Annexe D. Lorsque les résultats granulométriques sont analysés sous forme de diagramme triangulaire (figure 9), il est possible d'observer une tendance dans la répartition des échantillons. Les échantillons sont principalement composés de graviers et de sables, avec une proportion moins importante de silt et d'argile. Un seul échantillon contient moins de 25% de gravier ; il a été prélevé à la tourbière de Saint-Sylvère, ce qui concorde avec les observations visuelles sur le terrain.

Cette analyse ne permet pas de distinguer les faciès litho-sédimentaires associés aux échantillons. Un choix de mailles différentes pour le tamisage aurait permis de distinguer graviers, sables grossiers, sables fins, silts et argiles. Ceci aurait permis de connaître la

constitution précise d'un échantillon et de réaliser une évaluation de sa perméabilité (par exemple avec la méthode de Hazen).

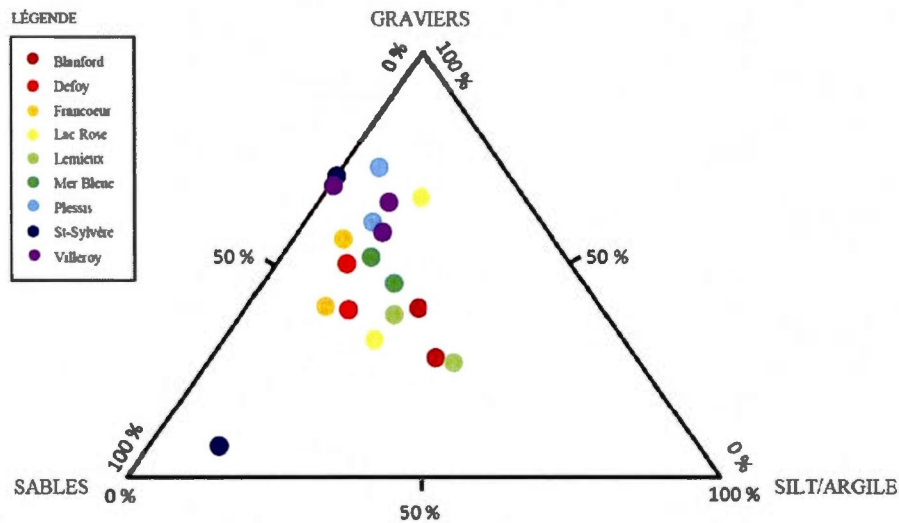


Figure 9-Distribution granulométrique des échantillons

Il a également été impossible de mesurer les propriétés hydrodynamiques des échantillons prélevés en raison du faible volume de matériel disponible (environ 5 cm³). De plus, il est possible que des erreurs de manipulation aient eu lieu, notamment dans le cas où un échantillon présentait plusieurs faciès et où ceux-ci ont pu être mélangés. Néanmoins, la texture sableuse grossière du substrat minéral sous toutes les tourbières à l'exception de Saint-Sylvestre montre que celles-ci peuvent avoir des liens directs avec l'aquifère sous-jacent. Aucune d'entre elles ne seraient donc complètement isolées du système hydrologique qui l'entoure. Il est important de souligner que la présence de dépôts relativement grossiers à la base des tourbières n'exclut pas la présence de matériaux beaucoup moins perméables (argile ou till compact) plus en profondeur. La présence d'une couche de faible perméabilité sous les dépôts grossiers est d'ailleurs fort probable étant donné que le territoire a été inondé par les eaux de la mer de Champlain. Les dépôts marins peu perméables pourraient avoir contribué à la mise en place initiale des dépôts organiques.

La texture des échantillons récoltés et analysés a été mise en parallèle avec la carte des dépôts de surface (Godbout et al., 2011). La figure 10 illustre les types de dépôt minéral sous-jacent aux tourbières étudiées. Selon la carte des dépôts de surface présentée au chapitre II, les analyses visuelles des sites et des échantillons ainsi que la granulométrie, les faciès litho-sédimentaires se trouvant sous les sites étudiés sont composés de till remanié par la mer de Champlain pour les tourbières situées au centre et au sud de la zone d'étude (Blanford, Defoy et Lemieux).

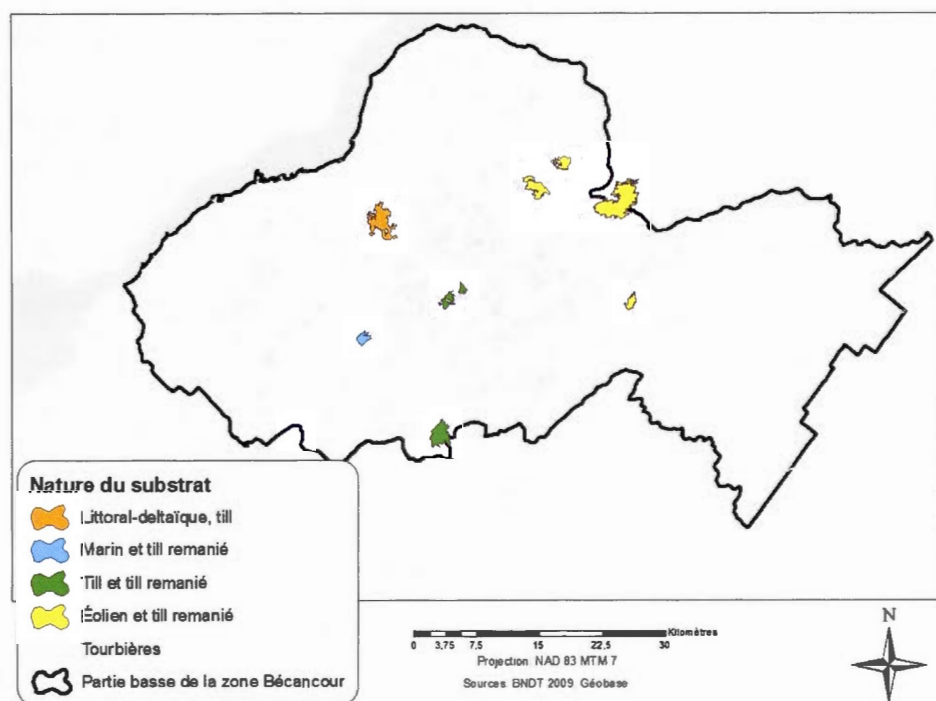


Figure 10-Distribution spatiale des types de dépôt minéral sous-jacent aux tourbières étudiées

Les faciès se trouvant sous les tourbières de Villeroy, Mer Bleue et Francoeur situées au nord et à l'est de la zone d'étude sont composés de till remanié et de dépôts de sables éoliens. Ces derniers sont présents en bordure des sites. La tourbière la plus en aval sur le bassin, celle du Lac Rose, repose pour sa part sur un substrat sableux d'origine littorale ou deltaïque et de till remanié. Finalement, la tourbière de Saint-Sylvère, la plus épaisse, repose sur des argiles glacio-marines et sur du till remanié, correspondant à l'ancien lit du proto Saint-Laurent. Le modèle 3D de la zone d'étude présentement en développement dans le *Projet de connaissance*

des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour permettra de vérifier cette cartographie.

3.3.4 Dates basales

Les dates basales montrent une évolution du début de l'entourbement depuis l'amont vers l'aval (figure 11), avec les âges basaux les plus anciens observés dans les tourbières de Villeroy (10 220 ans BP) et de Saint-Sylvère (10 260 ans BP), vers l'aval de la zone avec les tourbières de Mer Bleue (9620 ans BP) et de Lac Rose (9510 ans BP) (figure 11). Ces résultats indiquent que les tourbières se sont développées d'abord dans les parties les plus hautes de la zone d'étude et un peu plus tardivement vers le Fleuve Saint-Laurent, suivant la direction du retrait de la Mer de Champlain après la dernière glaciation et le relèvement isostatique associé. Ces âges correspondent également à ceux provenant de la littérature (e.g. Fillion, 1987).

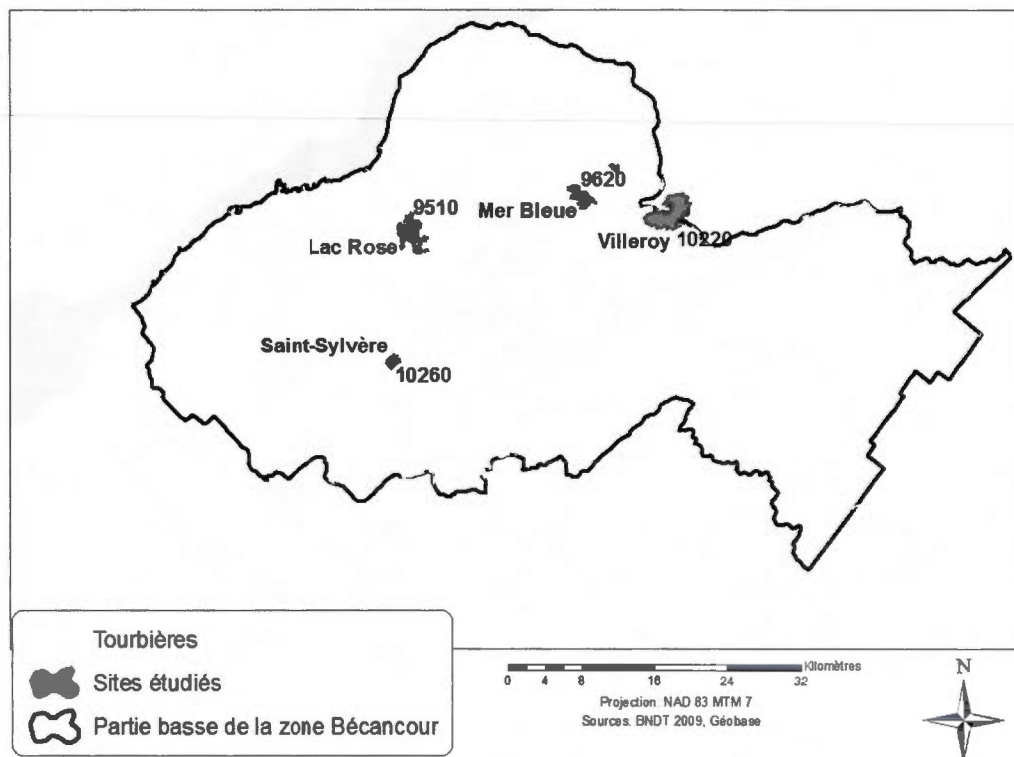


Figure 11- Dates basales (années étalonnées) pour quatre tourbières de la partie basse de la zone Bécancour

Ces résultats permettent d'avancer des hypothèses quant à l'entourbement de la partie basse de la zone Bécancour. L'inlandsis Laurentidien a atteint la région lors du dernier maximum glaciaire, laissant des dépôts de till sur la zone d'étude. Ces dépôts, minces lorsque le gradient topographique est important dans les Appalaches, sont plus épais dans les sections centre et amont de la zone. Lors du retrait du glacier, la Mer de Champlain a envahi la région jusqu'à 170 m d'altitude (e.g. Gadd, 1960 ; Occhietti et Richard, 2003), remanié le till en place et déposé des sédiments argileux et littoraux sur la région. Elle s'est retirée il y a environ 10 000 ans, laissant place au Lac à Lampsilis et à un système de drainage de direction sud-est nord-ouest. Le comblement des dépressions mal drainées est associé à ce contexte géomorphologique de la limite maximale de la mer de Champlain (150 m d'altitude). Peu de tourbières sont présentes au-dessus de cette limite et celles rencontrées sont de petite taille et confinée topographiquement. Vue leur position sur la zone d'étude, il est probable qu'elles reposent sur du till mince, mais ceci ne peut être vérifié puisqu'aucune des neuf tourbières étudiées ne se trouve dans cette zone.

La majorité des tourbières étudiées se trouvent donc entre 130 et 80 m d'altitude. Dans un corridor nord-est sud-ouest, des dépôts sableux remaniés par des processus éoliens synchrones ou légèrement postérieurs au début de l'entourbement ont favorisé la formation de dunes dont les dépressions ont été entourbées (Filion, 1987).

Les tourbières les plus près du fleuve sont les plus jeunes. Elles se sont mises en place sur les dépôts littoraux du proto Saint-Laurent ou sur les plages du Lac à Lampsilis. Les tourbières les plus jeunes reposent sur les alluvions récentes des rivières actuelles composés de sédiments relativement grossiers, au moins en surface.

3.3.5 Indications pour les échanges aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude

Le contexte géomorphologique des neuf tourbières étudiées est utile pour comprendre les échanges aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude. Toutefois, pour comprendre le rôle régional des tourbières, il est nécessaire d'extrapoler cette compréhension à l'échelle de la zone d'étude. La figure 12 illustre l'extrapolation des contextes géomorphologiques à l'ensemble de la région. L'extrapolation a été faite en étudiant les dépôts de surface dans l'environnement immédiat des tourbières et en les comparant à ceux des tourbières étudiées.

De plus, les données de Buteau (1996a ; 1996b ; 2000a ; 2000b) ont été utilisées pour compléter l'extrapolation.

Le nombre de tourbières, la somme et la moyenne des aires pour chacun des types de substrats sont présentés au tableau 2. Le minéral sous-jacent de sable éolien et de till remanié est le plus fréquent sur la zone d'étude. Une superficie de 8202 ha de tourbières se retrouve dans ce contexte. Les tourbières reposant sur un substrat de till remanié sont les deuxièmes plus fréquentes avec plus de 5336 ha. Les substrats de dépôts littoraux ou deltaïques et de till remaniés sont présents sous 1917 ha de tourbières, tandis que les substrats de dépôts d'alluvion et de till remanié se trouvent sous 1042 ha de tourbières. Les substrats de till mince sur roc et de dépôts marins sont les moins représentés, avec respectivement 801 et 329 ha.

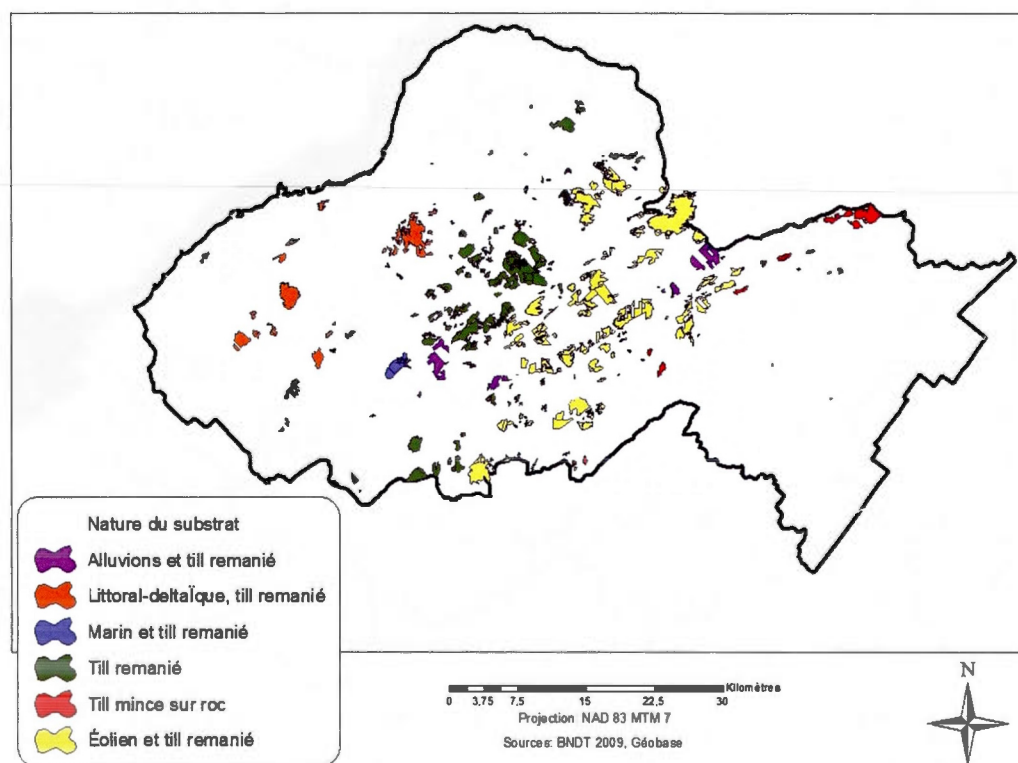


Figure 12--Contexte géomorphologique des tourbières extrapolés à l'ensemble de la partie basse de la zone Bécancour

Tableau 2-Type de substrat, nombre de tourbières, aires totale et moyenne

Type de substrat	Nombre de tourbières	Superficie totale (ha)	Superficie moyenne de chaque tourbière (ha)
Alluvions et till remanié	16	915	65,1
Sable éolien et till remanié	202	8202	42,5
Littoral-deltaïque et till remanié	41	1917	49,9
Marin et till	4	329	82,3
Till et ou till remanié	180	5336	31,8
Till mince sur roc	31	801	29,9
TOTAL	474	17 500	

En résumé, les tourbières de la zone d'étude reposent toutes sur les dépôts meubles quaternaires. Leur composition sableuse dominante est dans l'ensemble perméable aux écoulements. Ceci indique que l'eau souterraine peut transiter entre la tourbière et l'aquifère environnant et que les tourbières peuvent donc contribuer à la dynamique hydrogéologique de la région.

CHAPITRE 4

PERTURBATIONS DES TOURBIÈRES DE LA RÉGION DE BÉCANCOUR, CENTRE-
DU-QUÉBEC, ENTRE 1966 ET 2010.

Mise en contexte

L'objectif de ce chapitre, est de présenter l'évolution spatiale de la superficie occupée par les tourbières dans la partie basse de la zone Bécancour entre 1966 et 2010. Une introduction est d'abord présentée, suivie d'une description de la zone d'étude et de la méthodologie utilisée. Finalement, les résultats sont présentés et discutés. Ce chapitre est publié dans la revue le *Naturaliste canadien* (Avard et al., 2013).

**Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966
et 2010**

Karine Avard, Marie Larocque et Stéphanie Pellerin

Karine Avard (karineavard@hotmail.com) est étudiante à la maîtrise au Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal où elle est dirigée par Marie Larocque (larocque.marie@uqam.ca), professeure et hydrogéologue. Stéphanie Pellerin est chercheuse à l'Institut de recherche en biologie végétale et au Jardin botanique de Montréal.

Résumé

Les tourbières abondent dans l'ensemble du Québec, mais celles de la vallée du Saint-Laurent subissent des pressions anthropiques majeures. Ces pressions, et les pertes de superficies en tourbières qui en résultent, sont à peu près inconnues. Nous avons mesuré la superficie occupée par les tourbières en 1966 et 2010 dans la région de Bécancour, et identifié les perturbations récentes qu'elles ont subi à l'aide de la photo-interprétation et de validations sur le terrain. En 2010, les tourbières couvraient 17 500 ha, soit 6,1 % du territoire étudié. De cette superficie, 10 485 ha représentaient des tourbières encore intactes et 7 015 ha des tourbières ayant subi des perturbations limitées, notamment par la présence de canaux de drainage et de chemins forestiers. Entre 1966 et 2010, 5 433 ha de tourbières (près du quart des tourbières présentes en 1966) ont subi des perturbations irréversibles, principalement en raison de la culture de la canneberge (*Vaccinium macrocarpon* Aiton). Cette culture a connu un développement important au cours de la dernière décennie dans le Centre-du-Québec.

Mots clés : superficies, tourbières, perturbation, canneberge, photo-interprétation

4.1- Introduction

Les tourbières sont des zones humides où la saturation en eau favorise l'accumulation et la conservation de la matière organique. Au Canada, on reconnaît qu'une tourbière se caractérise par une accumulation minimale de 30 à 40 cm de tourbe (Kivinen et Pakarinen, 1981; Groupe de travail sur les terres humides, 1997). Les tourbières constituent des écosystèmes très répandus au Canada, couvrant environ 170 millions d'hectares (Gorham, 1990). Au Québec, elles couvriraient 16 millions d'hectares soit environ 12 % de la superficie de la province (L. Rochefort al., non publ.). Bien que les tourbières soient abondantes dans l'ensemble du Québec et que la plupart soient toujours exemptes de perturbations (Poulin al., 2004), celles situées dans la vallée du Saint-Laurent sont soumises à de fortes pressions anthropiques. Certains estiment même que dans cette région, 80 % des milieux humides et notamment des tourbières auraient disparu depuis la venue des premiers colons européens (Payette et Rochefort, 2001). Il n'existe toutefois aucune donnée sur les pertes réelles. Au cours des dernières décennies, les principales causes de disparition ou de dégradation des tourbières dans le sud du Québec furent l'agriculture, les activités forestières et l'extraction de la tourbe à des fins horticoles (Poulin al., 2004). D'autres pressions comme le remblaiement, le drainage, le prélèvement d'eau souterraine ou les changements climatiques peuvent également menacer leur équilibre hydrologique (Whittington et Price, 2006). Au fil des années, ces perturbations résultent en un isolement hydrologique et écologique croissant des tourbières au sein d'un paysage de plus en plus densément développé par l'agriculture, l'industrie et les centres urbains. Malgré cette situation, les connaissances sur l'état de perturbation des tourbières du Québec méridional restent extrêmement limitées.

Quelques régions du Québec ont fait récemment l'objet d'une cartographie détaillée des milieux humides, grâce notamment aux travaux de Canards Illimités Canada (p. ex.: Beaulieu al., 2010). Basées essentiellement sur une photo-interprétation stéréoscopique de photos aériennes numériques, ces cartes procurent un portrait unique

des régions et des portions de territoire potentiellement occupées par les tourbières. Les cartes disponibles sont cependant très récentes et il existe très peu de connaissances sur les superficies qui ont été occupées par les tourbières dans le passé, ce qui rend particulièrement difficile toute évaluation des pertes. De plus, seulement quelques tourbières ont jusqu'ici été cartographiées de manière détaillée avec une validation exhaustive sur le terrain (p. ex.: Tardy et Pellerin, 2005). Des données précises et à différentes périodes sont nécessaires pour quantifier l'évolution du territoire dans le temps, pour comprendre les facteurs responsables des changements observés et ainsi mieux protéger les tourbières les plus fragiles ou les plus précieuses d'un point de vue de conservation. Quelques études seulement ont quantifié les superficies de tourbières perdues au fil des années. Par exemple dans la grande région de Montréal, 30 % (118 ha) des tourbières ont disparu entre 1966 et 1981 (Champagne et Melançon, 1985). Dans la région de Rivière-du-Loup-Isle-Verte, 12 % des tourbières ont disparu entre 1929 et 2002 (perte nette de 187 ha), alors que 62 % (957 ha) ont subi des perturbations majeures (Pellerin, 2003). Finalement, entre 1934 et 1986, les superficies occupées par le Large Tea Field et le Small Tea Field (ouest de la Montérégie) ont subi des pertes de plus de 60 % de leur superficie initiale, soit une perte nette de 2400 ha (Jean et Bouchard, 1987).

La présente étude a été entreprise afin de déterminer comment les superficies occupées par les tourbières ont évolué entre 1966 et 2010 dans la région de Bécancour (figure 13). L'étude avait également pour objectif d'identifier les perturbations affectant présentement les tourbières de cette région. Dans cette étude, nous avons identifié comme tourbière toutes zones ayant un minimum de 30 cm de dépôts organiques, peu importe le type de tourbières (ombrotrophe ou minérotrophe) et leur physionomie (muscinaie, herbaceaie, arbustaie, arboraie).

Les tourbières de la région de Bécancour présentent un intérêt particulier pour plusieurs raisons. D'abord, elles occupent une proportion significative du territoire et quelques-unes sont de grande taille et encore relativement peu perturbées. Également, des pressions majeures ont été exercées sur ces tourbières, notamment par

l'expansion rapide de la culture de la canneberge (*Vaccinium macrocarpon* Aiton) au cours de la dernière décennie (Poirier, 2010). Finalement, le territoire étudié a fait récemment l'objet d'un projet de caractérisation des eaux souterraines dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines financé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (Larocque al., 2011). Un volet de ce projet vise tout particulièrement à mieux comprendre le rôle hydrologique des tourbières à l'échelle régionale (K. Avard, non publ.), ce qui a facilité la mise à disposition des données nécessaires pour la présente étude.

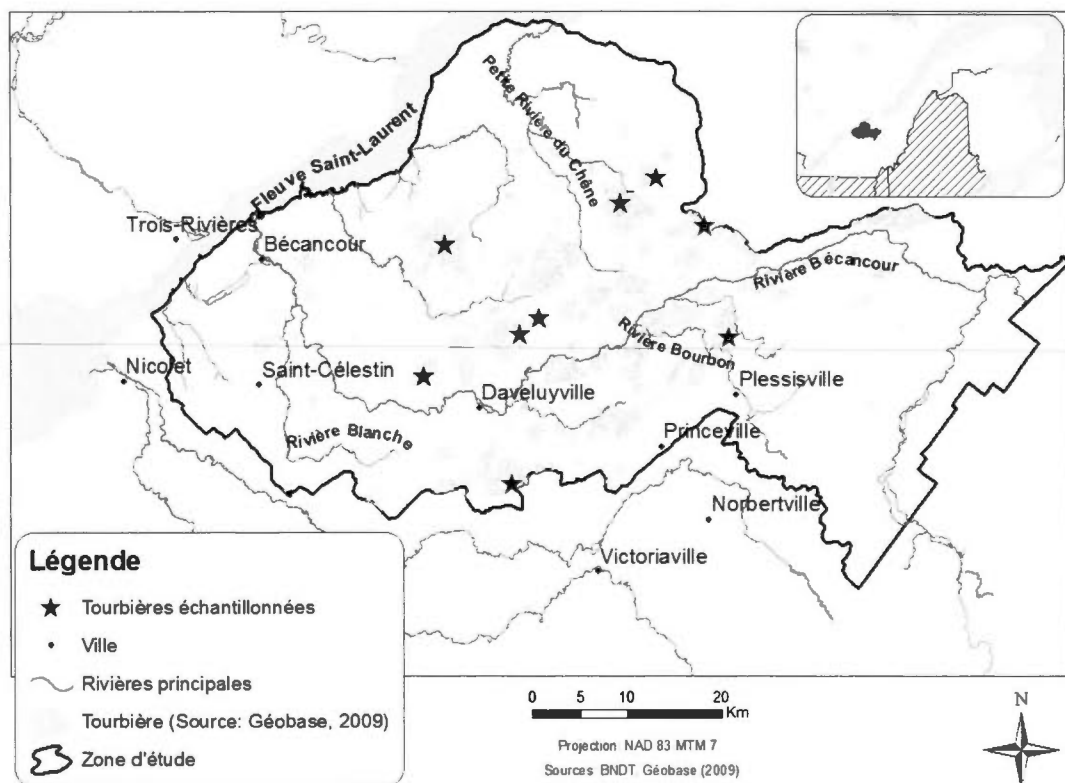


Figure 13- Localisation de la zone d'étude dans la région de Bécancour

4. 2- Secteur d'étude

4.2.1- Localisation et occupation du territoire

Le secteur d'étude correspond à la partie de la Zone de gestion des ressources en eau Bécancour (MDDEP, 2012) située dans le Centre-du-Québec. Le secteur couvre une partie du bassin versant de la rivière Bécancour ainsi que huit plus petits bassins versants qui se jettent directement dans le Fleuve Saint-Laurent, ce qui correspond à une superficie de 2 856 km² (figure 13). Ce territoire supporte une population d'environ 52 000 habitants. Près de la totalité du territoire est de tenure privée (99 %). L'utilisation du territoire est principalement forestière (58 %) et agricole (39 %), tandis que le milieu bâti couvre 3 % de la superficie (Morin et Boulanger, 2005).

4.2.2- Géologie de la région

Le secteur d'étude chevauche 2 régions physiographiques : les Appalaches en amont et les Basses-Terres du Saint-Laurent en aval. Ces régions sont séparées par la faille de Logan (St-Julien et Hubert, 1975). Les dépôts meubles s'amenuisent progressivement de la faille de Logan jusqu'aux sommets Appalachiens (Paré, 1981). La partie amont est principalement recouverte par 1 à 2 m de till de Gentilly (Gadd, 1955), d'où le roc affleure sporadiquement. Ce till a une faible teneur en particules fines, ce qui le rend perméable. La partie aval est surtout recouverte par les silts argileux de la Mer de Champlain. Ces dépôts se trouvent dans les zones de plus basses altitudes et peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (Gadd, 1955). Au centre de la zone, des dépôts de till remaniés par les eaux de la Mer de Champlain et lessivés de leurs particules fines affleurent sporadiquement en amont et de plus en plus régulièrement vers l'aval. Des dépôts de sables éoliens forment un corridor nord-sud au centre de la zone. Ils sont bordés d'arêtes subparallèles et les zones inter-dunes sont souvent occupées par des tourbières (Filion, 1987). Une synthèse complète et récente de la géologie du Quaternaire est présentée dans Godbout al. (2011).

4.2.3- Les tourbières

Les tourbières se trouvent essentiellement dans un axe nord-est sud-ouest au centre de la zone d'étude. Elles sont présentes entre la brusque chute de topographie des Appalaches et la limite aval du plateau des Basses-Terres, situé entre 80 et 130 m d'altitude. Les tourbières reposent principalement sur des dépôts de sables éoliens (47 % des tourbières) ou sur du till remanié (30 % des tourbières), mais on les retrouve également sur des dépôts littoraux (11 %), du till mince sur roc (5 %) ou des argiles marines (2 %) (K. Avard, non publ.). Comme les autres tourbières du sud du Québec, elles se mirent en place à partir du début de l'Holocène, soit après la dernière grande glaciation et le retrait de la Mer de Champlain (Muller al., 2003). Les dates basales de 4 tourbières du secteur et obtenues à l'aide de la datation C¹⁴ viennent confirmer cette hypothèse étant situées entre 10 260 et 9 510 ans BP. Les tourbières les plus anciennes se trouvent en amont et les plus récentes en aval de la zone d'étude (M. Larocque et M. Lavoie, non publ.).

Certaines données concernant les tourbières du secteur d'étude sont disponibles grâce notamment aux travaux de Buteau (1996a; 1996b; 2000a; 2000b). Cet auteur a réalisé plusieurs inventaires visant, entre autres, à identifier le régime trophique des tourbières, l'épaisseur de leurs dépôts et leur composition floristique. Il a également estimé la superficie des tourbières en se basant essentiellement sur une photo-interprétation, en visant les tourbières de plus de 40 ha. Les résultats de ses travaux montrent que les tourbières sur la zone d'étude sont principalement de type ombrotrophe arborées ou arbustives, que leur superficie moyenne serait de 277 ha et que leurs dépôts auraient une épaisseur moyenne de 1,5 m. Bien qu'une cartographie des superficies occupées par les milieux humides dans le Centre-du-Québec ait été faite récemment par Canards Illimités Canada (2012), celle-ci n'était pas disponible au début de nos travaux. De plus, cette cartographie exclut d'emblée les zones perturbées. Karine Avard (non publ.) a réalisé en 2011 un relevé exhaustif des épaisseurs de dépôts organiques sur 9 tourbières réparties dans le secteur d'étude. Ces

tourbières ont une épaisseur moyenne de 3,18 m. La culture de la canneberge exerce une pression particulièrement importante sur les tourbières de la région de Bécancour. Cette culture s'est développée rapidement au cours des dernières décennies. En 2009, on comptait 67 producteurs et plus de 2 500 ha consacrés à la culture de canneberges dans le Centre-du-Québec, ce qui en fait la première région productrice de canneberges, avec 80 % des producteurs québécois (Poirier, 2010).

4.3- Méthode

4.3.1- La photo-interprétation

Tout d'abord, un inventaire des photos aériennes disponibles entre 1930 et 2010 a été réalisé. Les photos prises en 1966 pour le compte du ministère des Terres et des forêts ont été choisies, car elles étaient de bonne qualité et que l'échelle (1:40 000) permettait de réduire le nombre de photos utilisées. De plus, ces photos ont une résolution de 1-2 m au pixel, une précision suffisante pour identifier les limites des tourbières. Il était aussi important d'utiliser des photos antérieures à l'expansion de la culture de canneberges qui a récemment affecté les tourbières du secteur. Les photos aériennes de 1966 ont été numérisées, géoréférencées et mosaïquées dans un Système d'informations géographiques (SIG) pour les fins de l'étude. Les tourbières observées sur ces photos ont été considérées comme la référence, c.-à-d. comme des tourbières intactes, même si des perturbations anthropiques avaient déjà eu lieu. Les perturbations de l'époque incluent notamment des coupes forestières, la construction de routes et de lignes haute tension, la transformation en champs agricole et la production limitée de canneberges (environ 20 ha). Une mosaïque des photos aériennes de 2010 (résolution au pixel de 20 cm), réalisée par l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec, a été utilisée pour déterminer les superficies actuelles des tourbières.

Les différences de grain, de couleur et de texture ont permis de délimiter les tourbières ouvertes. Dans le cas des tourbières forestières, en plus de ces différences

visuelles, l'utilisation du sol environnant a permis d'estimer les limites de la tourbière. Par exemple, les réseaux de drainage se trouvent généralement en bordure immédiate des sites tourbeux. Cette délimitation a permis de créer une carte préliminaire des milieux humides, d'abord pour la mosaïque de photos aériennes de 1966, puis pour celle de 2010.

4.3.2- Validation de la cartographie préliminaire

Les résultats de la photo-interprétation pour 2010 ont été validés sur le terrain pour 9 tourbières (figure 13) en suivant un protocole similaire à celui de Tardy et Pellerin (2005), soit un point de contrôle pour chaque 35 ha de superficie, avec un minimum de 10 points de contrôle par tourbière. Un point de contrôle consiste en un sondage à la sonde Hiller pour déterminer l'épaisseur des dépôts organiques en place. Rappelons qu'il fallait au moins 30 cm de tourbe pour qu'un point soit inclus dans la tourbière. Des points de contrôle supplémentaires ont été ajoutés afin de valider la photo-interprétation des zones plus difficiles à interpréter (limite entre tourbe et minéral dans les zones forestières, limite de perturbation et tourbière arbustive). Les points de contrôle sont localisés surtout à la périphérie des tourbières (figure 14). Au total, 126 points de contrôle ont été visités.

À l'aide des points de contrôle, des corrections ont été apportées aux limites des dépôts tourbeux des 9 sites. La délimitation de l'ensemble des tourbières de la région d'étude a ensuite été revue à la lumière de ces précisions. Les cartes ainsi corrigées pour 2010 ont été superposées à celles de 1966 pour assurer la cohérence des 2 délimitations, en faisant l'hypothèse qu'une tourbière n'a pu connaître d'expansion notable en 44 ans. Suite à la superposition des cartes, il a été possible de soustraire les superficies des tourbières délimitées en 2010 à celles de 1966. Il en est résulté une carte des superficies tourbeuses disparues, i.e. ayant subi des perturbations irréversibles, entre ces dates.

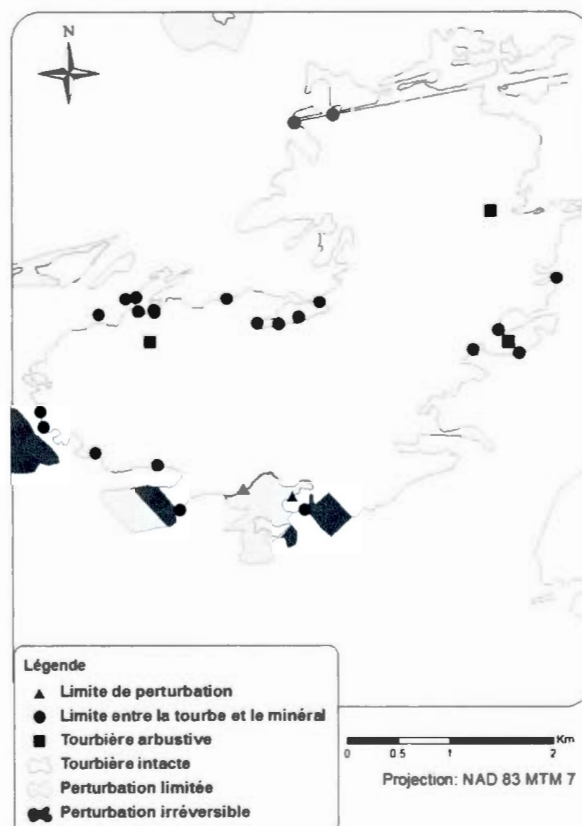


Figure 14-Exemple de localisation des points de contrôle sur la Grande tourbière de Villeroy

4.3.3- Analyse des perturbations

L'analyse détaillée de la mosaïque de 2010, dont la résolution est beaucoup plus grande, a permis d'identifier soit les secteurs de tourbière restés intacts, les secteurs ayant subi des perturbations limitées et les secteurs de tourbières ayant disparu suite à des perturbations irréversibles (figure 15).

Dans le cadre de ce travail, nous avons identifié les canaux de drainage isolés, les chemins forestiers, la coupe forestière et les lignes haute tension comme étant des perturbations limitées. Les secteurs avec perturbations irréversibles sont ceux ayant été affectés par la culture de canneberges, l'agriculture (céréalière ou maraîchère

indistinctement), les routes pavées et les bâtiments. Cette catégorie de perturbations irréversibles comprend aussi une classe « autres » qui inclut les perturbations plus difficilement identifiables par photo-interprétation (p. ex.: carrières, dépotoirs, remblais mineurs, etc.).

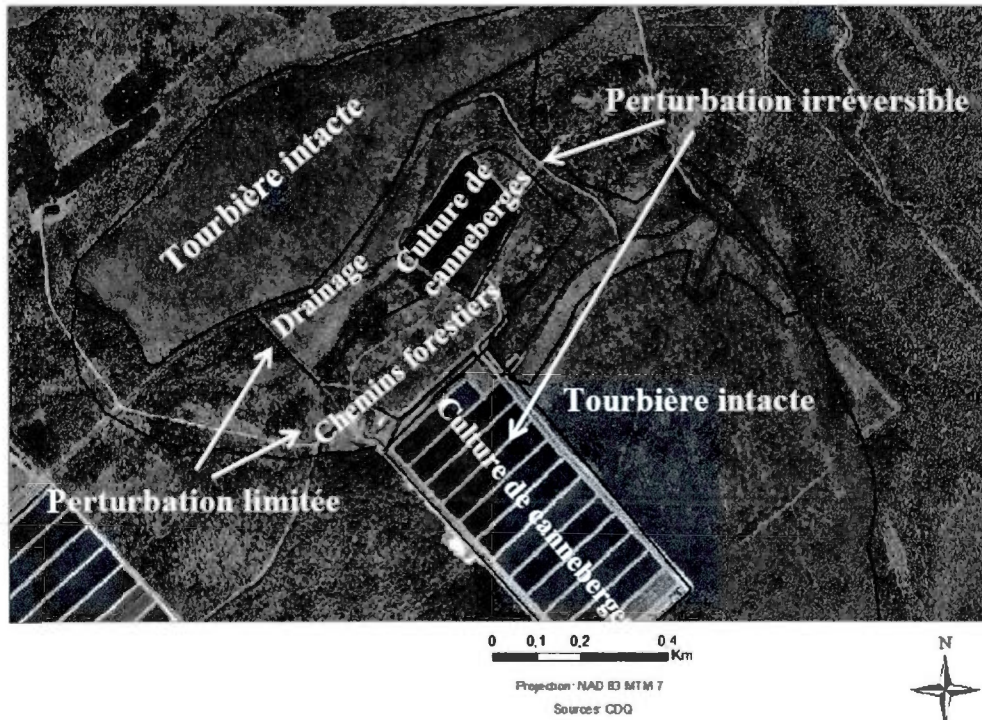


Figure 15- Exemple de perturbations à la tourbière Sainte-Anastasia

Pour les perturbations affectant des surfaces (coupe forestière, transformation d'une tourbière pour l'agriculture ou le milieu bâti), nous avons identifié la superficie des zones tourbeuses directement touchées. Dans les secteurs où plus d'une perturbation étaient présentes, nous n'avons considéré que la perturbation principale. Par exemple, un secteur de tourbière ayant subi une coupe forestière, mais sur lequel un canal de drainage est aussi présent dans la zone de coupe, aura été classé dans la catégorie coupe forestière et non drainage. Pour les perturbations linéaires (canaux de drainage, chemins forestiers, routes pavées, lignes haute tension, etc.), en plus des secteurs

directement touchés, nous avons délimité approximativement des zones tampons autour des infrastructures pour mieux représenter leur surface d'influence.

Pour les emprises de lignes électriques, une étude récente (Dubé al., 2011) a montré que la largeur moyenne d'entretien de la végétation sous une ligne électrique (coupe de la végétation ligneuse) dans les tourbières du sud du Québec est de 75 m et que l'influence de la présence de cette zone sur la végétation environnante est d'environ 9 m. Nous avons donc utilisé une zone de 10 m de part et d'autre de la zone d'entretien. Pour les canaux de drainage, nous avons utilisé une zone tampon de 50 m de part et d'autre, sur la base des travaux de Landry et Rochefort (2011). Pour les routes pavées et les chemins forestiers, nous avons également utilisé 50 m de part et d'autre de la chaussée (large de 15 m pour une route pavée et de 10 m pour un chemin forestier) puisque celle-ci est généralement bordée de canaux de drainage. Dans les cas où l'influence visible d'une perturbation linéaire excédait ces distances basées sur la littérature, l'impact spatial a été ajusté manuellement.

4.4- Résultats et discussion

4.4.1- Superficies tourbeuses

En 1966, la zone d'étude comptait 22 933 ha de tourbières considérées alors comme intactes, soit 8 % du territoire (figure 16). En 2010, la superficie couverte par les tourbières était de 17 500 ha, pour un total de 6,1 % du territoire. Cette superficie est inférieure d'environ 3 200 ha à celle obtenue par Canards Illimités Canada (2006) pour la même zone d'étude. Cette différence peut s'expliquer par la méthode d'analyse beaucoup plus précise que nous avons utilisée, notamment grâce aux points de validation. Il semble en effet que plusieurs secteurs forestiers tourbeux, mais avec un dépôt organique de moins de 30 cm, aient été inclus dans la catégorie tourbière par Canards Illimités Canada (2006). La proportion du territoire occupée par les tourbières en 2010 était inférieure à celle de l'ensemble de la province (12 % ; L. Rochefort al., non publ.), mais supérieure à celle des autres régions du Québec

méridional, comme la Montérégie (3,4 %) et Chaudière-Appalaches (2,9 %) (Canards Illimités Canada, 2006), 2 régions limitrophes de la zone d'étude.

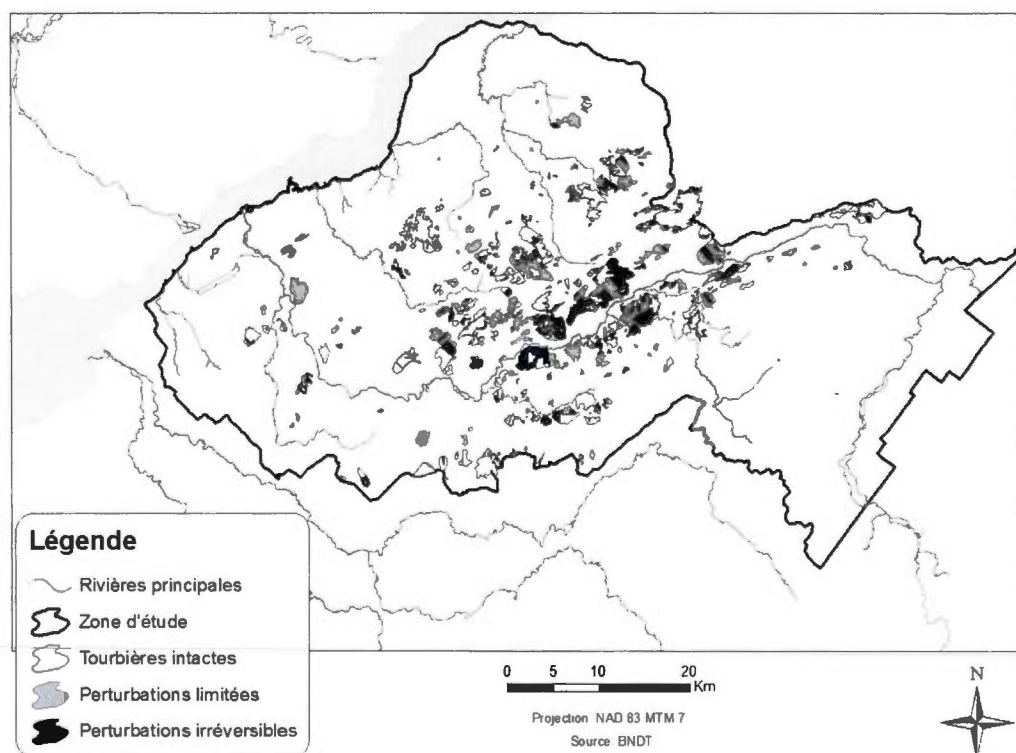


Figure 16- Tourbières de la zone d'étude et degré de perturbation

En 1966, la superficie des tourbières individuelles variait entre 0,2 et 1 268 ha. Il y avait 570 tourbières ayant une superficie moyenne de 42 ha (médiane 14 ha). En 2010, la zone d'étude comprenait 474 tourbières intactes ou ayant subi des perturbations limitées. Leur superficie variait entre 0,001 et 1 197 ha pour une moyenne de 39 ha (médiane 12 ha). Les superficies moyennes et médianes relativement faibles soulignent la présence de nombreuses petites tourbières qui n'avaient pas été identifiées dans les autres travaux réalisés dans la région (Buteau, 1996a; 1996b; 2000a; 2000b). Le fait que la médiane soit inférieure à la moyenne est une indication que les très grandes tourbières sont relativement rares.

Sur les 22 933 ha de tourbières recensés en 1966, 7 015 ha (30%) étaient touchés en 2010 par des perturbations limitées (figure 17) (tableau 3). Les canaux de drainage (4 558 ha) et les chemins forestiers (1 905 ha) sont les principales perturbations limitées identifiées. La coupe forestière (407 ha) et les lignes haute tension (145 ha) sont des types de perturbations limitées beaucoup plus marginales dans la région. Les perturbations limitées observées semblent spécifiques à la zone d'étude. Par exemple, elles diffèrent de celles rencontrées dans la région de Rivière-du-Loup-Isle-Verte, où la coupe forestière était la cause principale de perturbations limitées (Pellerin, 2003).

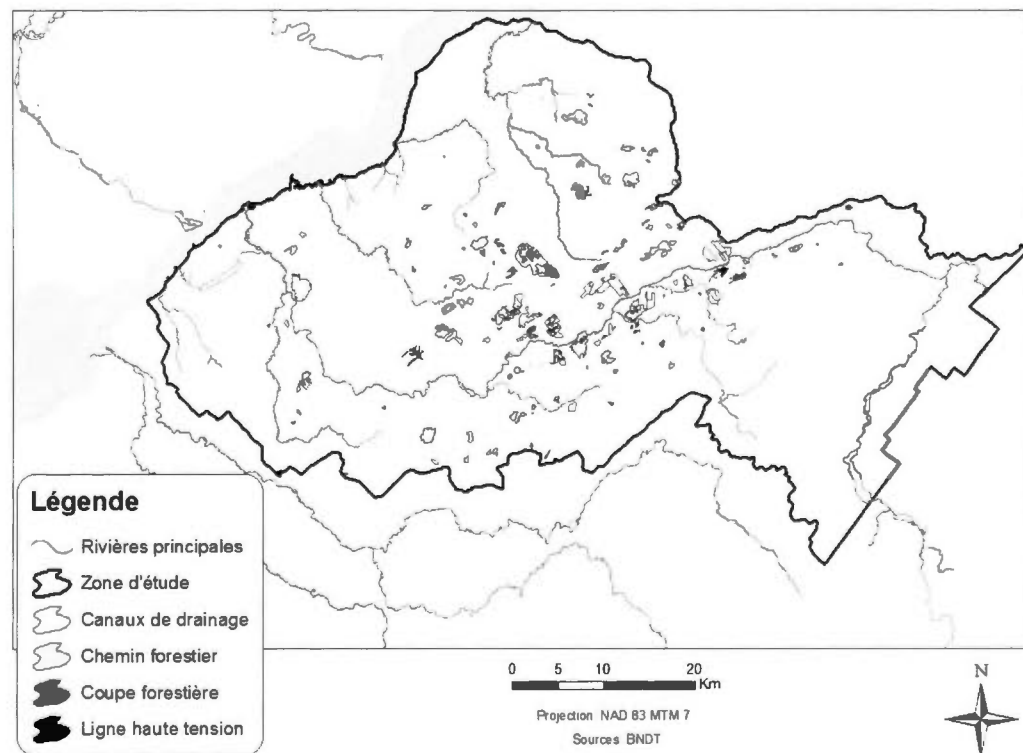


Figure 17- Localisation et types de perturbations limitées

4.4.2- Pertes entre 1966 – 2010

Entre 1966 et 2010, 5 433 ha de tourbières ont subi des perturbations irréversibles, ce qui représente 24% des tourbières présentes en 1966 (tableau 3). La disparition de 4033 ha de tourbière est reliée à la production de canneberges directement sur les

dépôts tourbeux. Ce mode de production de la canneberge était courant il y a quelques années. Aujourd'hui, on ne le retrouve que de marginalement dans les secteurs où les dépôts organiques sont relativement minces (< 1 m) en bordure des tourbières. Les cultures récentes se trouvent surtout sur les dépôts sableux en périphérie des tourbières. Les conséquences de la production de la canneberge sur la dynamique hydrologique et écologique des tourbières voisines ne sont cependant pas bien connues (Julien Caron, 2009). Les autres activités ayant entraîné la perte de superficies tourbeuses sont l'agriculture céréalière et maraîchère (630 ha), la construction de routes pavées et de bâtiments (223 ha) et diverses causes indéterminées (556 ha; catégorie "autres"). Toutes ces perturbations sont considérées majeures, car elles peuvent entraver de manière importante le fonctionnement hydrologique et la dynamique écosystémique des tourbières. Même si ces perturbations cessent, il est peu probable que l'accumulation de tourbe reprenne à court ou moyen terme sans intervention majeure.

Tableau 3- Superficies occupées en 2010 par les tourbières intactes, les tourbières avec perturbation limitée et les tourbières avec perturbation irréversible

	Superficie (ha)
Tourbières intactes	10 485
Tourbières avec perturbation limitée	
- Canaux de drainage	4558
- Chemins forestiers	1905
- Coupe forestière	407
- Ligne haute tension	145
Tourbières avec perturbation irréversible	
- Culture de canneberges	4033
- Agriculture céréalière ou maraîchère	630
- Routes pavées et bâtiments	223
- Autres	547
TOTAL	22 933

En pourcentage du territoire initialement couvert par les tourbières, les pertes observées dans la région de Bécancour se comparent à celle rapportées pour la grande région de Montréal où 30 % des tourbières ombrotrophes (118 ha) ont disparu entre 1966 et 1981, principalement en raison de l'expansion de la culture maraîchère dans les banlieues nord et sud de l'île de Montréal (Champagne et Melançon, 1985). Les pertes sont toutefois inférieures à celles de plus de 60 % (2 400 ha) répertoriées pour les tourbières Large et Small Tea field, en Montérégie, en raison de la culture céréalière (Jean et Bouchard, 1988), mais supérieures à celles observées dans la région de Rivière-du-Loup-Isle-Verte de 12 % (187 ha; Pellerin, 2003).

4.5-Conclusion

L'interprétation des photos aériennes de 2010 et les validations sur le terrain ont montré que la partie de la Zone de gestion des ressources en eau Bécancour située dans le Centre-du-Québec est un territoire où l'on trouve encore aujourd'hui de grandes superficies occupées par les tourbières. Les validations sur le terrain au moyen de nombreux points de contrôle manuels sont essentielles pour obtenir une cartographie précise surtout dans des régions, comme celle à l'étude, où de vastes superficies sont occupées par des tourbières forestières très difficilement différenciables des forêts humides sans dépôts organiques (p. ex.: les marécages). Les résultats montrent que 24 % des superficies occupées par les tourbières en 1966 ont aujourd'hui disparu, tandis que 30 % ont subi des perturbations limitées. Les canaux de drainage et les chemins forestiers sont les principales perturbations limitées observées dans la zone d'étude. La culture de canneberges est la principale cause de disparition des tourbières dans cette région entre 1966 et 2010.

Notre recherche apporte une connaissance détaillée des superficies occupées par les tourbières et des perturbations dont elles font l'objet dans la région de Bécancour. Notre méthodologie pourrait être appliquée dans d'autres régions du Québec où la couverture de photos historiques est complète. Les connaissances qui en découlent

sont essentielles pour assurer une gestion équilibrée du territoire et le développement durable des ressources.

4.6- Remerciements

Les auteurs remercient le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs pour sa contribution financière à cette étude. Les auteurs remercient également les propriétaires privés, de même que les MRC de Bécancour, de l'Érable, de Lotbinière, de Nicolet-Yamaska, d'Arthabaska et l'Association de Chasse et Pêche de Plessisville pour avoir autorisé l'accès à leur terrain. Finalement, les auteurs remercient l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec pour la mosaïque de photographies aériennes 2010.

4.7- Références

- Beaulieu, J., G. Daigle, F. Gervais, S. Murray et C. Villeneuve, 2010. Rapport synthèse de la cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal. Canards Illimités - Québec et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 60 p.
- Buteau P., 1996a. Inventaire des tourbières de la région des Bois-Francs (31I/01). Ministère des Ressources Naturelles, 75 p.
- Buteau, P., 1996b. Inventaire des tourbières de la région des Bois-Francs (31I/08). Ministère des Ressources Naturelles, Québec, 45 p.
- Buteau, P., 2000a. Inventaire des tourbières des Basses-Terres du Saint-Laurent (21L/05). Ministère des Ressources Naturelles, Québec, 102 p.
- Buteau, P., 2000b. Inventaire des tourbières des Basses-Terres du Saint-Laurent (21L/04). Ministère des Ressources Naturelles, Québec, 5 p.
- Canards Illimités Canada, 2006. Centre-du-Québec, Plan régional de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes, 1 carte. Disponible en ligne à : <http://www.canardsquebec.com>. [Visité le 11-09-19]
- Canards Illimités Canada, 2012. Cartographie détaillée des milieux humides du territoire du Centre-du-Québec, 1 carte. Disponible en ligne à : <http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=0e110ef42c3741acb6c37a6407836cda>. [Visité le 12-04-01]
- Champagne, J. et M. Melançon, 1985. Milieux humides de la région de Montréal, 1966-1981. Environnement Canada, Direction générale des Terres, Ottawa, 21 p.
- Dubé, C., S. Pellerin et M. Poulin, 2011. Do power line rights-of-way facilitate the spread of non-peatland and invasive plants in bogs and fens? Botany, 89: 91-103.
- Filion, L., 1987. Holocene development of parabolic dunes in the central St. Lawrence Lowland. Quaternary Research, 28 : 196-209.
- Gadd, N.R., 1955. Pleistocene geology of the Becancour map-area, Quebec. Thèse de doctorat, University of Illinois, Chicago, 191 p.
- Géobase, 2009. Couverture du sol, Circa 2000-vectorielle. Centre d'information topographique, secteur des sciences de la Terre, Sherbrooke, Québec, 2 cartes.
- Godbout, P.-M., M. Lamothe, V. Horoi et O. Caron, 2011. Synthèse stratigraphique, cartographie des dépôts quaternaires et modèle hydrostratigraphique régional, secteur

- de Bécancour, Québec : Rapport final. Université du Québec à Montréal, Montréal, 37 p.
- Gorham, E. 1990. Biotic impoverishment in northern peatlands. Dans : Woodwell, G.M. (edit.). *The Earth in transition*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 65-98.
- Groupe de travail national sur les terres humides, 1997. *Système de classification des terres humides du Canada*. Deuxième édition, Centre de recherche sur les terres humides, Université de Waterloo, Waterloo, 76 p.
- Jean, M. et A. Bouchard, 1987. La végétation de deux tourbières de la municipalité régionale de comté du Haut-Saint-Laurent (Québec). *Canadian Journal of Botany*, 65 : 1969-1988.
- Julien Caron, R., 2009. Analyse des impacts de la production de canneberge au Centre-du-Québec en fonction des objectifs de développement durable. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 92 p.
- Kivinen, E. et P. Pakarinen, 1981. Geographical distribution of peat resources and major peatland complex types in the world. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae A III*, 132 : 1-28.
- Landry, J. et L. Rochefort, 2011. Le drainage des tourbières : impacts et techniques de remouillage, Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 53p.
- Larocque, M., S. Gagné et L. Tremblay, 2011. Rapport d'étape Phase II. Projet de connaissances des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour. Université du Québec à Montréal, Montréal, 73 p.
- Morin P. et F. Boulanger, 2005. Portrait de l'environnement du bassin versant de la rivière Bécancour. Enviro-Action, Plessisville, 247 p.
- Muller S., P. Richard et A.C. Larouche, 2003. Holocene development of a peatland (southern Québec): a spatio-temporal reconstitution based on pachymetry, sedimentology, microfossils and macrofossils. *The Holocene*, 13 : 649-664.
- Paré, D., 1981. Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Bécancour. Ministère de l'Environnement du Québec, Service des eaux souterraines, Programme de connaissances intégrées, Québec, 74 p.
- Payette, S. et L. Rochefort, 2001. Écologie des tourbières du Québec-Labrador, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 621 p.
- Pellerin, S., 2003. Des tourbières et des hommes; l'utilisation des tourbières dans la région de Rivière-du-Loup-Isle-Verte. *Le Naturaliste Canadien*, 127 (1) : 18-23

- Poirier, J., 2010. La canneberge au Québec et dans le Centre-du-Québec. Un modèle de développement durable, à la conquête de nouveaux marchés. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Victoriaville, 36 p.
- Poulin, M., L. Rochefort, S. Pellerin et J. Thibault, 2004. Threats and protection for peatlands in eastern Canada. *Géocarrefour*, 79 : 331-344.
- St-Julien P. et C. Hubert, 1975. Evolution of the Taconian orogeny in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, 275 : 337-362.
- Tardy, G. et S. Pellerin, 2005. Complexe tourbeux du delta de Lanoraie : État de la situation. Institut de recherche en biologie végétale, 17 p.
- Whittington P.N. et J. Price, 2006. The effects of water table draw-down (as a surrogate for climate change) on the hydrology of a fen peatland, Canada. *Hydrological Processes*, 20 : 3589-3600.

CHAPITRE 5

CONNEXIONS AQUIFÈRE-TOURBIÈRE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

5.1 Introduction

Les objectifs de ce chapitre sont 1) d'estimer les volumes d'eau échangés entre les tourbières et l'aquifère ainsi que les directions de ces échanges et 2) d'estimer l'importance des échanges latéraux entre l'aquifère et les tourbière par rapport aux autres flux. Les méthodes utilisées sont d'abord présentées et les résultats sont ensuite interprétés.

Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'une communication orale au colloque "Les connaissances sur les eaux souterraines régionales: acquisition et transfert" de l'Acfas qui s'est tenu à Montréal les 7 et 8 mai 2012.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Cartes piézométriques détaillées autour des tourbières étudiées

Une piézométrie détaillée a été tracée autour des neuf tourbières caractérisées dans les chapitres précédents. Dans quatre des neufs sites (Lac Rose, Mer Bleue, Saint-Sylvère et Villeroy), des chroniques piézométriques mensuelles dans le minéral et dans la tourbe étaient disponibles pour l'été 2011. Ces tourbières ont été instrumentées pour réaliser un suivi hydrologique et géochimique de l'eau souterraine par une étudiante de maîtrise (M. Ferlatte) et un étudiant au doctorat (R. Ravonjiarivelo) dans le cadre d'un autre projet de recherche dont un des objectifs est de mettre en lumière des indicateurs physico-chimiques des échanges aquifère-tourbière (financement FQRNT-Partenariats actions concertées sur les eaux souterraines). Ces tourbières sont instrumentées au moyen de profils de cinq piézomètres disposés dans le substrat minéral voisin à la tourbière et dans les dépôts organiques. Dans ce mémoire, seules les données du piézomètre dans le minéral (à 25 m de la bordure de la tourbière) et du premier piézomètre dans la tourbe (1,1 m dans la tourbe et à 50 m du début de la tourbière) sont utilisées puisqu'ils caractérisent les échanges entre les deux milieux. Les niveaux piézométriques ont été mesurés manuellement une fois par mois de mai à septembre 2011.

Pour compléter les données sur ces quatre tourbières et sur les cinq autres tourbières étudiées (Blanford, Defoy, Francoeur, Lemieux et Plessis), des niveaux piézométriques ont été mesurés manuellement entre novembre 2011 et janvier 2012 dans des puits privés, dans des

forages mis en place dans le cadre du «*Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour*» et à certains endroits où la nappe affleure (cours d'eau ou drain en bordure des tourbières). Des niveaux piézométriques du Système d'informations hydrogéologiques (SIH, 2010) ont également été utilisés. Malgré tout, le nombre de niveaux de nappe disponible est relativement faible. Le tracé de la carte piézométrique détaillée de la nappe libre a donc été contraint par la topographie (niveaux limités à l'altitude du sol). Les niveaux disponibles ont montré qu'à proximité des tourbières, le niveau piézométrique se trouve à environ 1 m sous la surface. Le niveau piézométrique dans les tourbières a été estimé en utilisant l'altitude à 25 m de la bordure de la tourbière fournie par le modèle numérique de surface fourni par l'Agence de Géomatique du Centre-du-Québec.

5.2.2 Calcul des flux échangés entre l'aquifère et les sites d'étude

Les flux échangés entre l'aquifère et la tourbière sont calculés en utilisant la méthode par segments de Rosenberry et LaBaugh (2008) illustrée à la Figure 18. Cette méthode est une application en plan de l'équation de Darcy (eq. 1).

$$Q = KA \left(\frac{H_1 - H_2}{L} \right) \quad (1)$$

où:

Q = débit passant à travers le plan entre la tourbière et l'eau souterraine [L^3/T]

K = moyenne géométrique entre la conductivité hydraulique du minéral et de la tourbe [L/T]

A = aire du plan formé par la longueur du segment et l'épaisseur de la tourbe [L^2]

H_1 = niveau de la nappe dans l'aquifère [L]

H_2 = niveau de la nappe dans la tourbière [L]

L = distance entre les piézomètres [L]

Elle présuppose que tous les flux entrants dans les tourbières se font de manière horizontale et qu'aucun flux vertical n'est présent. Cette estimation est nécessairement approximative, vu la présence de matériaux relativement perméables à la base de huit des neuf tourbières étudiées et puisque des flux verticaux non négligeables peuvent également se produire. Ces

flux sont toutefois considérés comme négligeables comparativement aux flux latéraux. Les tourbières sont divisées en segments ayant un gradient piézométrique constant (estimé à partir de la carte piézométrique détaillée) et un substrat minéral similaire. L'équation (1) est appliquée à chacun des segments de la tourbière. La somme des débits des segments permet de connaître la quantité totale d'eau échangée et la direction des échanges entre la tourbière et l'aquifère.

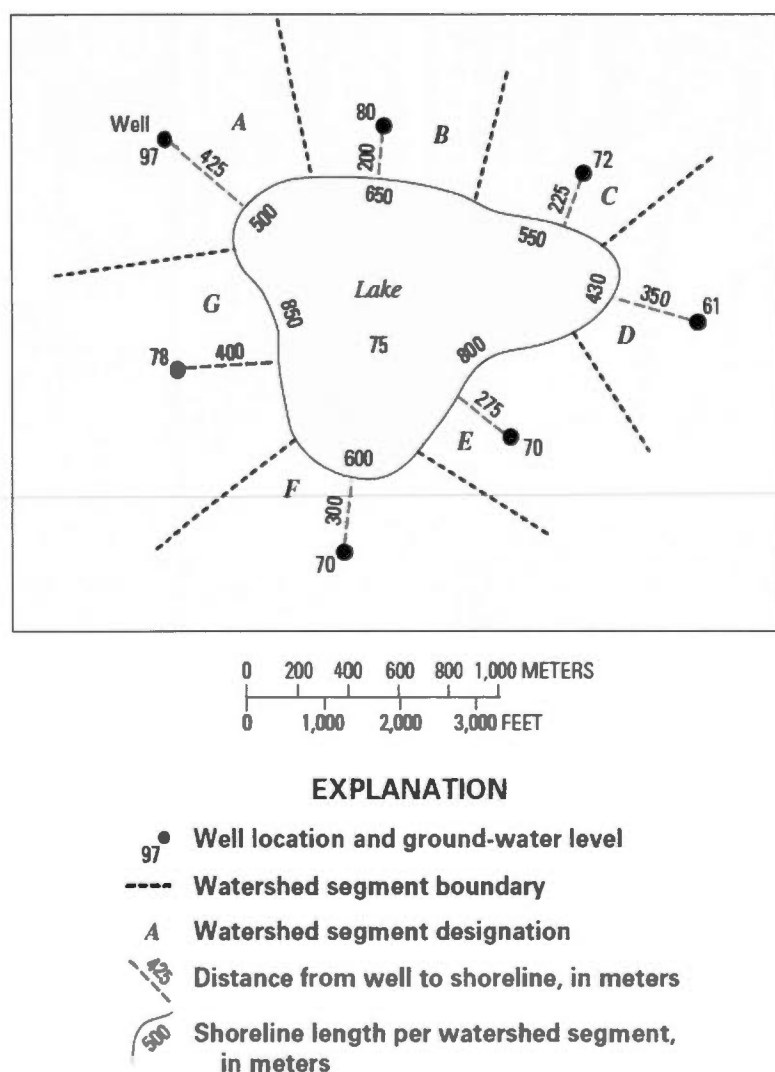


Figure 18-- Illustration de l'approche par segments (tirée de Rosenberry et LaBaugh, 2008)

Pour ces calculs, la conductivité hydraulique du minéral provient des résultats de 102 tests effectués dans les dépôts de surface entourant les tourbières avec un perméamètre de Guelph (Fernandes, 2010 ; Godbout et al., 2011). Les histogrammes des logarithmes des conductivités hydrauliques pour les trois formations rencontrées au voisinage des tourbières, soit les sédiments sableux éoliens (Ed, 11 échantillons), les sédiments sableux littoraux et pré-littoraux (Mgb, 23 échantillons) et le till remanié (Tr, 21 échantillons), sont illustrés à la figure 19 tandis que les conductivités hydrauliques moyennes sont présentées au tableau 4. La conductivité hydraulique la plus élevée correspond aux sédiments sableux éoliens et la plus faible aux sédiments sableux littoraux et pré-littoraux. La conductivité hydraulique de l'argile n'a pas été mesurée par perméamètre de Guelph. Une valeur de $1,4 \times 10^{-9}$ m/s, estimée par Pharand (2006) dans un contexte géologique similaire sur un sous-bassin de la rivière Yamaska a été retenue.

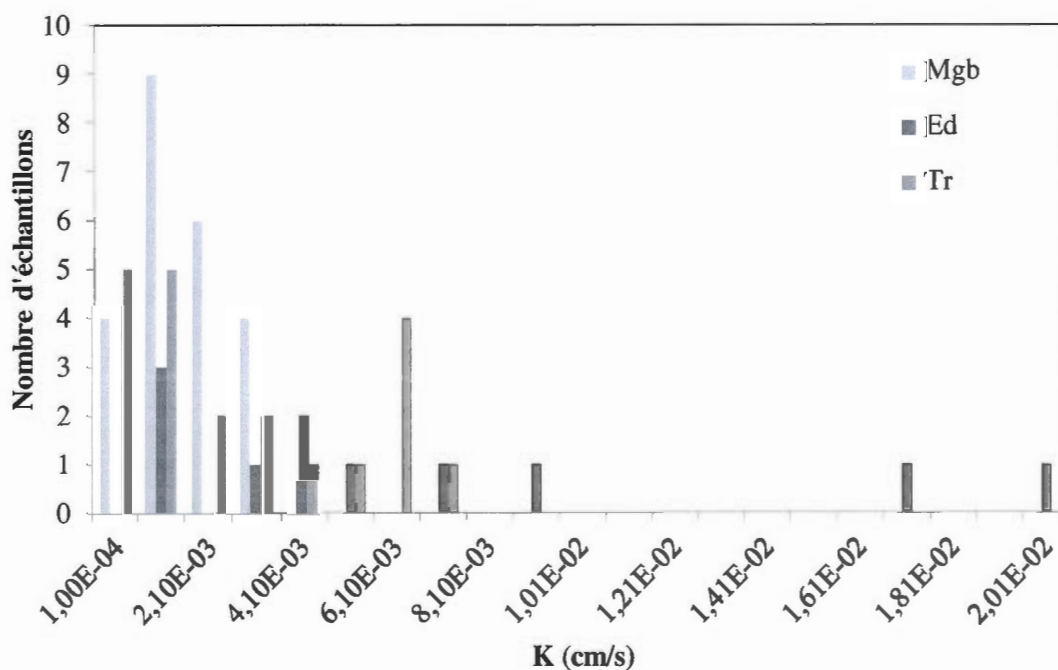


Figure 19-Histogramme de fréquence des conductivités hydrauliques

Tableau 4-Moyenne logarithmique et moyenne équivalente des conductivités hydrauliques mesurées avec le perméamètre de Guelph

	Moyenne \log_K (cm/s)	K moyen (m/s)
Ed	-2,51	0,0000311
MGb	-3,32	0,0000048
Tr	-3,20	0,0000063

Puisque l'acrotelme est généralement beaucoup plus perméable que le catotelme, il donc la plus grande partie des échanges. La conductivité hydraulique des dépôts organiques n'a pas été mesurée *in situ* dans ce projet. Afin de refléter cette incertitude, deux valeurs possibles de conductivité hydraulique ont été utilisées pour l'acrotelme, soit 10^{-2} et 10^{-3} m/s. Une seule valeur de conductivité a été utilisée le catotelme, soit 10^{-6} m/s. Ces valeurs correspondent à la gamme des conductivités hydrauliques mesurées par Rosa et Larocque (2008) aux tourbières de Lanoraie dans Lanaudière. Pour calculer le paramètre A de l'équation 1, la longueur de chaque segment de tourbière est multipliée par 0,40 m, épaisseur théorique de l'acrotelme, puis par l'épaisseur moyenne de la tourbière identifiée au chapitre précédent moins 0,40 m, soit la partie du catotelme impliquée dans les échanges. Le niveau piézométrique dans le substrat minéral, H_1 , est déterminé à partir de la carte piézométrique détaillée à la limite où le gradient vers la tourbière change de direction ou d'intensité, afin de représenter le gradient qui influence les écoulements entre la tourbière et l'aquifère. Le niveau piézométrique dans la tourbe est estimé à partir de la carte piézométrique détaillée.

5.2.3 Bilans hydriques

Afin de déterminer le rôle des échanges aquifère-tourbière sur la dynamique hydrologique d'une tourbière entière, les échanges ont été comparés avec les autres flux entrants et sortants des tourbières. L'équation suivante doit être utilisée dans l'établissement du bilan hydrique d'une tourbière.

$$\sum \text{flux entrants} = \sum \text{flux sortants} \quad (2)$$

$$P + Q_{\text{aquifère}} = ETP + Q_{\text{exutoire}} \pm \Delta S \quad (3)$$

où P représente les apports verticaux (précipitations liquides et fonte de la neige), $Q_{\text{aquifère}}$ le flux entrant (ou sortant) via l'aquifère, ETP est l'évapotranspiration potentielle, Q_{exutoire} est le débit sortant de la tourbière par écoulement de surface et ΔS est la variation d'emmagasinement dans la tourbière.

Les apports verticaux (précipitations liquides plus fonte de la neige) ont été fournis par Poirier (2012). Puisque ces apports varient peu sur l'ensemble de la zone d'étude, une valeur unique de 1047 mm/an (station de Lemieux), correspondant à la moyenne de 2000 à 2009 a été utilisée pour les neuf tourbières étudiées. L'évapotranspiration a été calculée avec la méthode de Oudin al. (2005). En raison d'une faible variation spatiale de l'ETP, une seule série de données de températures de l'air correspondant à la station de Lemieux a été utilisée pour calculer les ETP. La valeur moyenne pour la période 2000 à 2009 est de 565 mm/an. La pluie nette (précipitations moins évapotranspiration) est donc de 482 mm/an.

Les tourbières étudiées sont souvent situées en tête de bassin versant et elles ont toutes un exutoire de surface qui prend la forme d'un cours d'eau (terme Q_{exutoire}) dans l'équation 3. Il est également possible que de petits ruisseaux apportent de l'eau à certaines tourbières. À l'exception de la tourbière de Villeroy pour laquelle un autre projet de recherche est en cours, les débits aux exutoires ne sont toutefois pas disponibles. Pour la tourbière de Villeroy, les débits des 21 exutoires ont été mesurés en calculant l'aire d'une section moyenne du ruisseau et en mesurant la vitesse de l'eau à cette section. Une bouteille d'eau était remplie au 3/4 et le temps mis pour traverser la section était chronométré (les vitesses étant très faibles, un débitmètre n'a pu être utilisé). Ces mesures, prises le 12 avril 2012, permettent de compléter le bilan hydrique de ce site pour ce mois. Comme les valeurs de pluie nette, soit les apports verticaux moins l'ETP, n'étaient pas encore disponibles pour 2012, la moyenne des valeurs du mois d'avril 2000 à 2009 pour cette zone a été utilisée. Les échanges horizontaux utilisés dans le calcul sont ceux obtenus avec l'approche segmentée. Dans ce cas, le terme ΔS est évalué par défaut en faisant le bilan de tous les autres termes.

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Cartes piézométriques détaillées autour des tourbières étudiées

Les cartes piézométriques détaillées pour les neuf sites d'étude sont présentées à l'Annexe E. Elles montrent également que la piézométrie autour des tourbières est peu influencée par l'écoulement régional, sauf dans le nord de la zone d'étude, pour la tourbière Francoeur et Mer Bleue. Pour les autres tourbières, la piézométrie est principalement influencée par le contexte géomorphologique environnant. Les tourbières de Lac Rose, Lemieux et Villerooy montrent des écoulements de la tourbière vers l'aquifère, centrés à partir de la tourbière. Ces sites reposent dans une dépression topographique au centre d'un plateau de diamètre variable. La piézométrie de Blanford, Defoy, Plessis et Saint-Sylvère est dictée par la géomorphologie, et les écoulements ne sont ni dirigés vers la tourbière, ni dans le sens de l'écoulement régional. À l'exception des tourbières de Francoeur et de Mer Bleue, les zones de topographie plus accentuée, constituées de dunes ou de dépôts de till remanié modelé par les dépôts fluvio-glaciaires, sont également les zones de plus haut niveau de nappe. Dans ces segments, les flux sont généralement orientés de l'aquifère vers la tourbière. Les zones de plus basse topographie sont généralement constituées de till remanié étendu ou de dépôts fluvio-glaciaires. Dans ces segments, les flux sont dirigés de la tourbière vers l'aquifère.

Il est important de souligner que les cartes piézométriques détaillées ont été tracées avec un nombre limité de données, prises à divers moments de l'année. Il est probable que les cartes piézométriques, et donc les directions d'écoulements, varient au cours de l'année.

5.3.2 Flux aquifère-tourbière sur les neuf tourbières étudiées et bilans hydriques partiels

Les cartes montrant la division des tourbières en segments sont présentées à l'Annexe E. Les paramètres utilisés dans l'équation 1 et les résultats des calculs de flux pour chacun des neuf sites étudiés sont présentés à l'Annexe F. Les résultats montrent que pour une même tourbière, les flux peuvent varier significativement dans l'espace. En effet, la piézométrie étant influencée par la topographie, elle peut varier de plusieurs mètres autour d'une même

tourbière. Ceci a pour effet de faire varier l'amplitude et même la direction des flux selon les segments calculés.

Le tableau 5 présente les flux latéraux totaux échangés avec l'aquifère pour les neuf tourbières, en m³/j et % de la pluie nette (482 mm/an) pour les neuf tourbières étudiées. Les flux minimum et maximum représentent les deux bornes de l'intervalle des conductivités hydrauliques de l'acrotelme qui ont été utilisées. Dans les deux cas, la conductivité hydraulique du catotelme est de 10⁻⁶ m/s et celles du dépôt minéral sont présentées au tableau 4. Compte tenu de son ordre de grandeur de deux à trois fois supérieur aux conductivités hydrauliques du catotelme et du minéral, c'est la variation de la conductivité hydraulique de l'acrotelme qui contrôle le plus les résultats. Des tests ont montré que l'impact de la variation de la conductivité hydraulique du catotelme est négligeable sur les apports horizontaux. Un flux positif indique un apport d'eau de l'aquifère vers la tourbière tandis qu'un flux négatif indique une alimentation de l'aquifère par la tourbière.

Tableau 5-Flux horizontaux (m³/j et %) de la pluie nette

	Flux horizontal minimum (m³/j)	Flux horizontal minimum (%)	Flux horizontal maximum (m³/j)	Flux horizontal maximum (%)
Blanford	87	8	274	23
Defoy	103	1	313	3
Francoeur	-35	1	-104	4
Lac Rose	-411	5	-1097	11
Lemieux	-367	15	-965	32
Mer Bleue	-28	0,6	-76	2
Plessis	146	7	409	19
Saint-Sylvère	2	0,1	5	0,3
Villeroy	-155	1	-371	2

Les résultats montrent que les tourbières de Blanford, Defoy, Plessis et Saint-Sylvère reçoivent plus d'eau de l'aquifère qu'elles n'en perdent. Celles de Francoeur, Lac Rose, Lemieux, Mer bleue et Villeroy alimentent l'aquifère plus qu'elles ne reçoivent d'eau de celui-ci. La tourbière de Saint-Sylvère est un site d'échanges très limités car elle est entourée

principalement de dépôts argileux peu perméables. L'importance des échanges latéraux relativement à la pluie nette varie de 0,1 à 15% (flux minimum) et de 0,3 à 32% (flux maximum), tandis que la moyenne de l'ensemble des sites varie de 4 à 11% relativement à la pluie nette pour la conductivité hydraulique de l'acrotelme la plus élevée.

La figure 20 montre la répartition spatiale des plages de flux horizontaux calculés pour les neuf tourbières. Trois reçoivent globalement de l'eau de l'aquifère, cinq alimentent l'aquifère et une n'a pratiquement pas d'échanges avec l'aquifère. Des flux négatifs sont observés pour les tourbières situées dans la portion nord de la zone d'étude. Ils sont présents pour 75% des tourbières reposant sur un substrat sableux éolien et de till remanié, 100% des tourbières sur un substrat sableux et de till remanié et pour 33% des tourbières reposant uniquement sur le till remanié. Les tourbières situées dans la portion sud présentent des flux positifs, c'est-à-dire un apport d'eau de l'aquifère à la tourbière. Ce type d'interaction est observé pour les 66% des tourbières qui reposent sur des dépôts de till remanié et 100% des tourbières qui reposent sur un substrat marin et de till remanié. La nature des dépôts et leur processus de mise en place contrôlent la conductivité hydraulique du matériel. Également, le processus de mise en place des dépôts contrôle leur morphologie. Par exemple, un dépôt sableux remanié par des processus éoliens forme des dunes paraboliques convexes et ont une conductivité hydraulique élevée car ce sable est bien trié. Un dépôt sableux de till remaniés par la mer de Champlain aura une topographie relativement plane et une conductivité hydraulique plus faible que celle du sable éolien.

La figure 21 illustre la distribution spatiale de l'importance relative des flux horizontaux échangés avec l'aquifère. Les résultats ne montrent pas de tendance spatiale claire en lien avec la composition et la forme des dépôts. L'altitude de la tourbière ne semble pas influencer l'importance relative des flux horizontaux. Tel que mentionné précédemment, la tourbière de Saint-Sylvere, qui s'est formée sur un substrat argileux d'origine marine peu perméable, montre beaucoup moins d'échanges avec l'aquifère environnant.

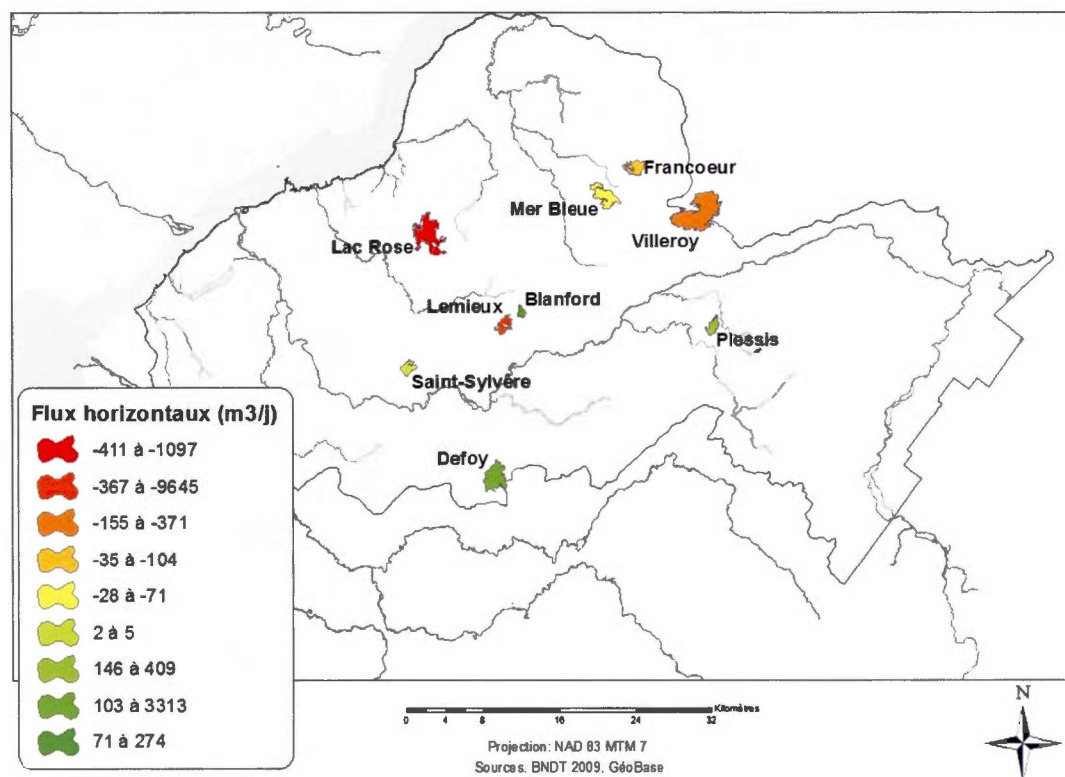


Figure 20- Répartition spatiales des échanges aquifère-tourbière calculés avec l'équation de Darcy selon l'approche segmentée

Des flux négatifs sont observés pour les tourbières situées dans la portion nord de la zone d'étude. Ils sont présents pour 75% des tourbières reposant sur un substrat sableux éolien et de till remanié, 100% des tourbières sur un substrat sableux et de till remanié et pour 33% des tourbières reposant uniquement sur le till remanié. Les tourbières situées dans la portion sud présentent des flux positifs, c'est-à-dire un apport d'eau de l'aquifère à la tourbière. Ce type d'interaction est observé pour les 66% des tourbières qui reposent sur des dépôts de till remanié et 100% des tourbières qui reposent sur un substrat marin et de till remanié. La nature des dépôts contrôle la conductivité hydraulique du matériel par sa granulométrie.

La figure 21 illustre la distribution spatiale de l'importance relative des flux horizontaux échangés avec l'aquifère. Les résultats ne montrent pas de tendance spatiale claire en lien avec la composition et la forme des dépôts. L'altitude de la tourbière ne semble pas

influencer l'importance relative des flux horizontaux. Tel que mentionné précédemment, la tourbière de Saint-Sylvère, qui s'est formé sur un substrat argileux d'origine marine peu perméable, montre beaucoup moins d'échanges avec l'aquifère environnant.

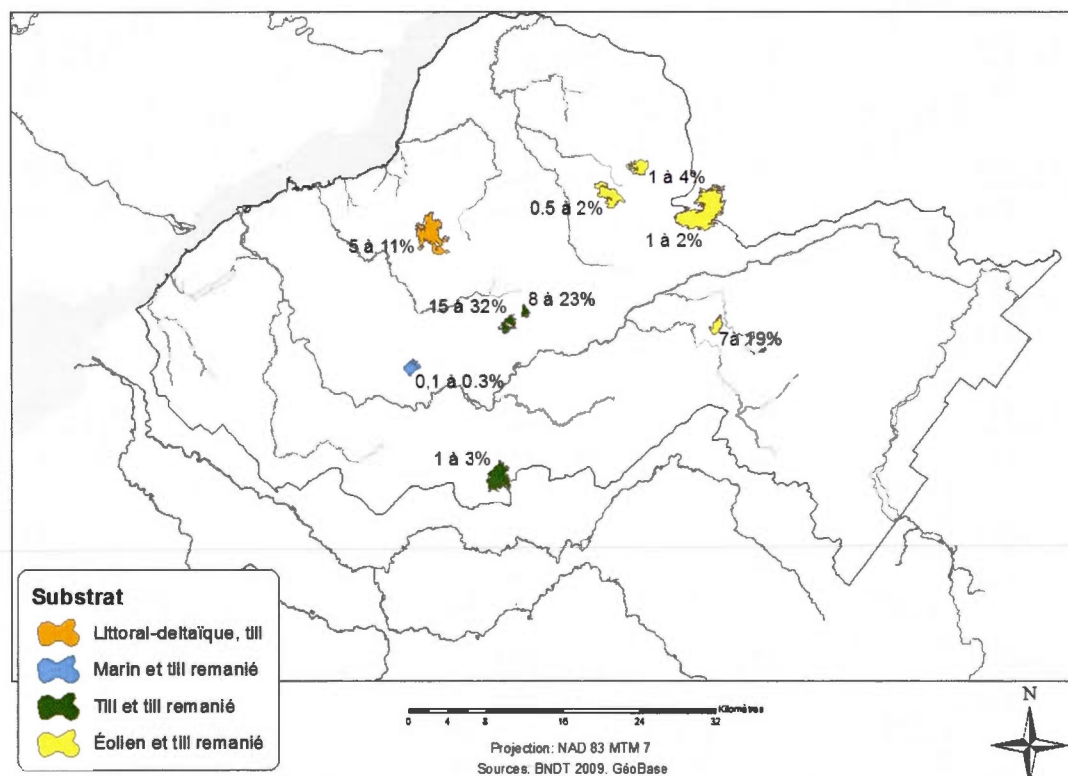


Figure 21- Répartition spatiale de l'importance relative des flux horizontaux

Les flux calculés ici doivent être considérés comme d'un ordre de grandeur illustratif des flux réels. La méthode segmentée de Darcy est relativement imprécise à plusieurs égards. Puisqu'elle ne tient compte que des échanges latéraux, les résultats n'intègrent pas les éventuels échanges verticaux qui peuvent se produire entre la tourbière et le substrat sous-jacent. Par ailleurs, les calculs ne tiennent pas compte de la variation possible des échanges dans le temps, au cours d'une année. De plus, les conductivités hydrauliques ont été obtenues à partir un nombre restreint de mesures et peuvent différer des conductivités hydrauliques des

matériaux directement en contact avec la tourbière. Également, les épaisseurs de l'acrotelme et du catotelme (moyenne de sondages manuels) utilisées dans les calculs peuvent ne pas représenter avec exactitude les épaisseurs réelles impliquées dans les échanges. Finalement, il est important de souligner que ce bilan partiel ne permet pas de tenir compte de la partie de la pluie nette qui ruisselle à la surface de la tourbière pour ensuite être évacuée aux exutoires. L'infiltration à travers les dépôts organiques, et donc l'apport réel d'eau atmosphérique à la tourbière est probablement plus faible que la pluie nette. La figure 22 montre que la valeur absolue des volumes d'eau échangés (c'est-à-dire soit des flux entrants ou sortants de la tourbière) ne semble pas être corrélée linéairement avec la superficie de la tourbière.

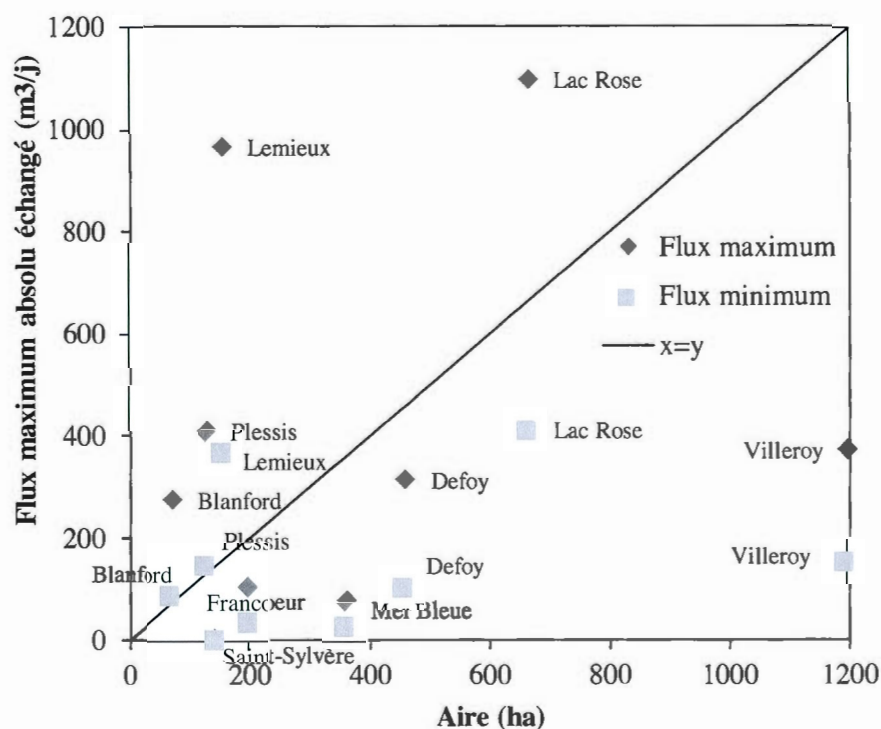


Figure 22- Valeur absolue des flux échangés en fonction de la superficie de la tourbière

Les figures 23 et 24 montrent la relation linéaire ($R^2 = 0,22$ et $R^2 = 0,19$) entre la valeur absolue des flux minimum et maximum échangés et le périmètre de la tourbière.

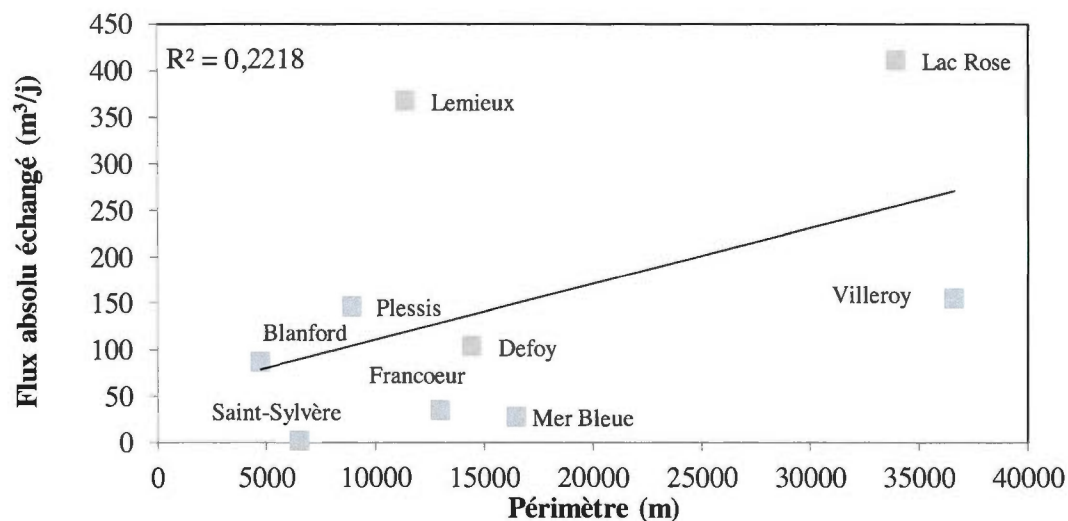


Figure 23- Valeur absolue des flux minimum échangés en fonction du périmètre de la tourbière

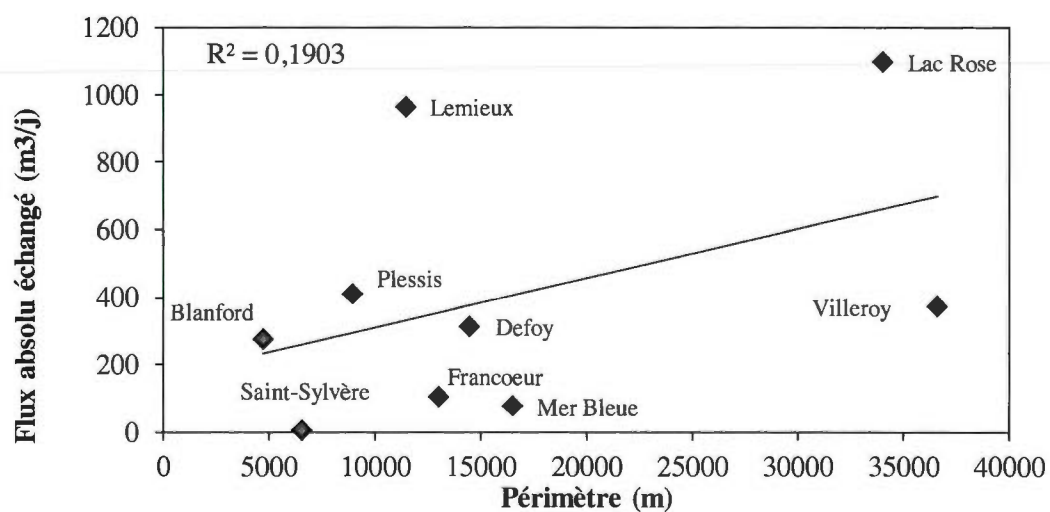


Figure 24- Valeur absolue des flux maximum échangés en fonction du périmètre de la tourbière

Un bilan hydrique complet a été réalisé pour le mois d'avril 2012 à la tourbière de Villeroi (voir tableau 6). La somme des flux latéraux est négative, mais certaines zones de la tourbière

sont tout de même alimentées par l'aquifère (voir Annexe F). Les débits entrants sont toutefois faibles comparativement aux apports verticaux. Il est considéré ici que les flux latéraux totaux sont représentatifs des conditions rencontrées en avril 2012. Pour cette période, les flux entrants dans la tourbière proviennent donc à près de 100% des apports verticaux, sous forme de pluie ou de fonte de la neige. Les flux latéraux comptent pour moins de 1 % des extrants, tandis que l'évapotranspiration et les débits des exutoires comptent respectivement pour 32 et 67% des extrants. Selon ce bilan, le terme ΔS est relativement peu important et correspond à une baisse du niveau piézométrique de 0,07 mm/jour. Ce bilan a été obtenu en divisant la somme des intrants et des extrants par l'aire de la tourbière. Compte tenu que les mesures ont été réalisées en période printanière, un débit d'exutoire important, il est plausible que la tourbière décharge de l'eau à ce rythme à cette période de l'année. Un bilan hydrique complet sur une année de la tourbière de Villeroy est en cours de réalisation dans le cadre d'un autre projet.

Tableau 6-Bilan hydrique de la tourbière de Villeroy en avril 2012

		Données brutes		Flux correspondant (m ³ /j)
Flux entrants	P	98	mm	39086
Flux sortants	Q _{aquifère_MAX}	-371	m ³ /j	-371
	Q _{aquifère_MIN}	-155	m ³ /j	-155
	ETP	38,4	mm	15298
	Q _{exutoires}	0,371	m ³ /s	32054
TOTAL	ΔS_{MAX}			-8637
	ΔS_{MIN}			-8421

5.3.3 Flux aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude

Afin de déterminer le rôle régional des tourbières sur l'aquifère, il est nécessaire d'estimer les flux moyens échangés entre les deux milieux à l'échelle de toute la zone d'étude. Il a été établi dans le chapitre III qu'il y a 17 500 ha de tourbières dans la zone. La pluie nette moyenne entre 2000 et 2009 a été estimée à 482 mm. Rapporté à la superficie totale de toutes les tourbières de la partie basse de la zone Bécancour, cet apport correspond à un débit de 2,6 m³/s la pluie nette reçue par l'ensemble des tourbières en moyenne sur la partie basse de

la zone Bécancour. Considérant que les apports latéraux représentent en moyenne entre 4 et 11% de la pluie nette, c'est donc entre 0,01 et 0,03 m³/s qui transite entre l'aquifère et les tourbières à l'échelle du bassin. Selon les résultats obtenus pour les sites à l'étude, il est possible d'estimer que les échanges aquifère-tourbière sont à environ 33% de l'aquifère vers la tourbière, à environ 56% de la tourbière vers l'aquifère et à 11% sans échange. Il est donc possible d'estimer que les débits s'échangeant de la tourbière vers l'aquifère se situent entre 0,0056 et 0,0168 m³/s, tandis que les flux de l'aquifère vers la tourbière sont entre 0,0033 et 0,0099 m³/s (tableau 7).

Tableau 7-Données disponibles pour l'extrapolation des flux aquifère-tourbière à l'échelle de la zone d'étude

Sites étudiés	
Aire de tourbières (ha)	17500
Pluie nette (mm/an)	482
% horizontaux de la pluie nette:	
Moyenne minimum	4
Moyenne maximum	11
Flux horizontaux totaux (m³/s)	
Minimum	0,01
Maximim	0,03
% sites en recharge	33
% sites en décharge	56
% sites sans échanges	11
Extrapolation à la zone d'étude	
Flux entrant (m³/s) min	0,0033
Flux entrant (m³/s) max	0,0099
Flux sortant (m³/s) min	0,0056
Flux sortant (m³/s) max	0,0168

Les tourbières jouent donc un rôle de tampon dans le système hydrologique et hydrogéologique, déchargeant l'aquifère aux endroits où le niveau piézométrique est plus

élevé, et le rechargeant aux endroits où il est plus bas. Ce rôle permet à l'ensemble de l'aquifère de garder un niveau relativement constant dans le temps. En comparaison, le débit d'étiage $Q_{2,7}$, soit à une récurrence de deux ans, sept jours consécutifs de la rivière Bécancour à la station hydrométrique 024003, située en amont de la rivière, est de $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Même si à l'échelle régionale, les volumes semblent faibles, ils sont significatifs dans la zone où se concentrent les tourbières et jouent un rôle primordial dans l'environnement immédiat de celles-ci. Les flux alimentant l'aquifère permettent d'éviter une baisse des niveaux piézométriques lorsque les précipitations sont plus faibles, tandis que le stockage temporaire de l'aquifère au sein de la tourbière permet d'éviter les inondations et le ruissellement de l'eau excédentaire, surtout en période très humide comme par exemple à la fonte des neiges.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire était de déterminer le rôle des tourbières sur l'aquifère régional dans la partie basse de la zone Bécancour. Cet objectif a été atteint par la connaissance de la superficie précise et du contexte géomorphologique des tourbières sur la zone d'étude. Ces connaissances ont permis d'estimer les flux échangés. Ces estimations ont été extrapolées à l'ensemble de la zone, permettant de mieux comprendre le rôle des tourbières sur l'hydrogéologie régionale.

Dans le chapitre IV, le contexte géomorphologique de neuf tourbières a été étudié. La moyenne des profondeurs maximales des tourbières a été établie à 3,18 m par sondages manuels. Ces sondages ont également permis de déterminer que toutes les tourbières ont au moins partiellement un substrat de granulométrie suffisamment grossière pour permettre des échanges avec l'aquifère. Les substrats les plus souvent rencontrés à l'échelle du bassin sont les dépôts de sables éoliens et de till remanié, de même que les dépôts de till remanié. Les dates basales ont confirmé l'hypothèse selon laquelle les tourbières se sont mises en place après le retrait de la Mer de Champlain qui se retirait, il y a environ 10 000 ans.

Dans le chapitre III, les superficies et les degrés de perturbation des tourbières ont été définis. Il y a actuellement 17 500 ha de tourbière sur la zone basse de la Bécancour. De ce nombre, 10 485 ha sont intacts, et 7 015 ha sont légèrement perturbés. Les perturbations les plus fréquentes sont les canaux de drainage et les chemins forestiers. De plus, il a été possible de déterminer qu'entre 1966 et 2010, près de 24% des superficies des tourbières existantes en 1966 ont disparu principalement en lien avec l'exploitation de la canneberge. La connaissance de la superficie exacte de tourbière est primordiale pour connaître leur rôle hydrogéologique à l'échelle régionale.

Dans le chapitre V, les cartes piézométriques détaillées autour des tourbières ont été tracées et utilisées pour calculer les flux échangés entre la tourbière et l'aquifère, selon une adaptation de l'équation de Darcy. Les flux échangés ont été estimés entre -1 097 et 409 m³/jour, selon les sites et la conductivité hydraulique de l'acrotelme utilisée. Il a été estimé que ces flux représentent en moyenne entre 4 et 11% de l'ensemble des apports totaux à la tourbière. Considérant la caractérisation géomorphologique de neuf tourbières, les flux entre l'aquifère et la tourbière ont été estimés à 33% vers la tourbière et à 56% vers l'aquifère superficiel, tandis que 11% n'ont aucun échange.

Cette recherche montre que les tourbières ont des échanges relativement limités, en termes de flux, à l'échelle régionale. Toutefois, comme elles redistribuent localement l'eau des précipitations vers l'aquifère ou vers le réseau de surface, elles permettent probablement de stabiliser les niveaux dans l'aquifère superficiel voisin et de maintenir les débits de base des cours d'eau en période d'étiage. Ces conditions d'humidités favorisent à leur tour le maintien des écosystèmes locaux face aux variations hydroclimatiques intra et inter annuelles. Il est fort possible que ces fonctions hydrologiques aient un impact sur l'hydrologie régionale, mais la présente étude ne permet pas de le démontrer directement. Une modélisation hydrogéologique et hydrologique régionale tenant compte des tourbières en tant que réservoirs poreux distribués sur le territoire serait requise pour apporter des conclusions à cet égard.

C'est la première fois au Québec qu'une telle étude est entreprise à l'échelle régionale. La méthodologie développée pourrait facilement être reproduite dans des contextes géo-climatiques similaires, apportant ainsi une meilleure compréhension de la connexion des tourbières avec l'aquifère superficiel. Cette connaissance est nécessaire pour assurer une gestion intégrée des ressources en eau et une protection adéquate des milieux humides.

ANNEXE A

Localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

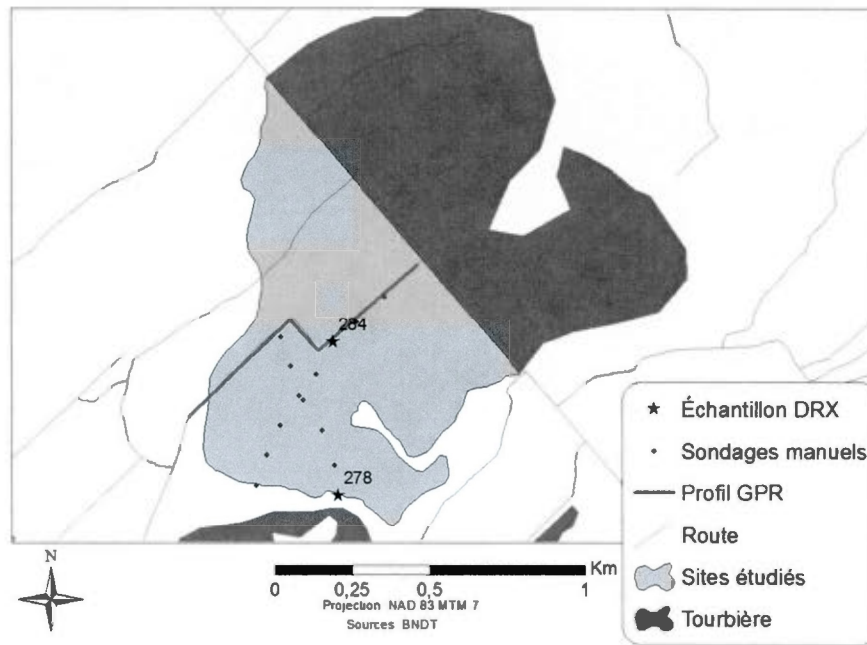


Figure 25-Tourbière de Blanford : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

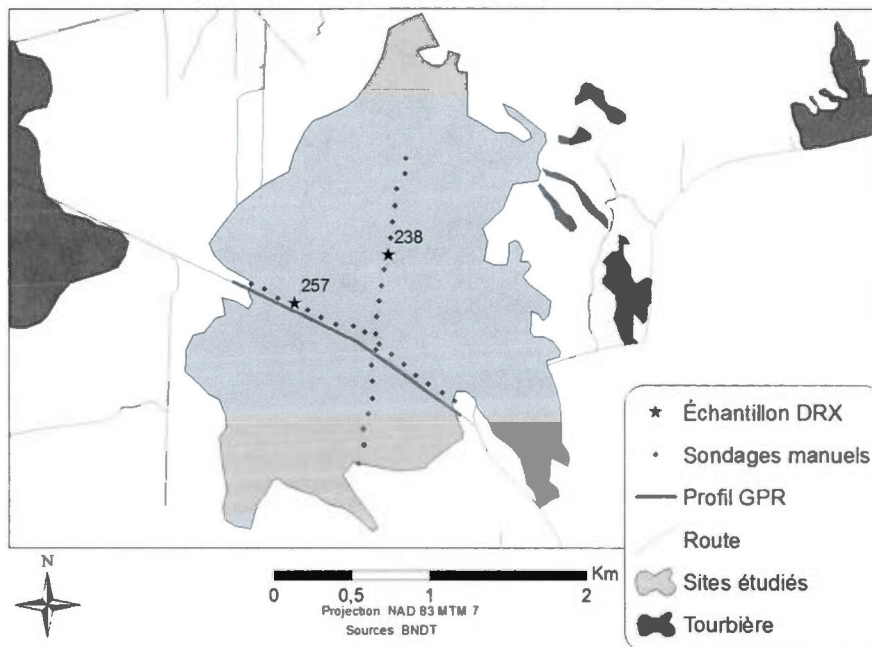


Figure 26-Tourbière de Defoy : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

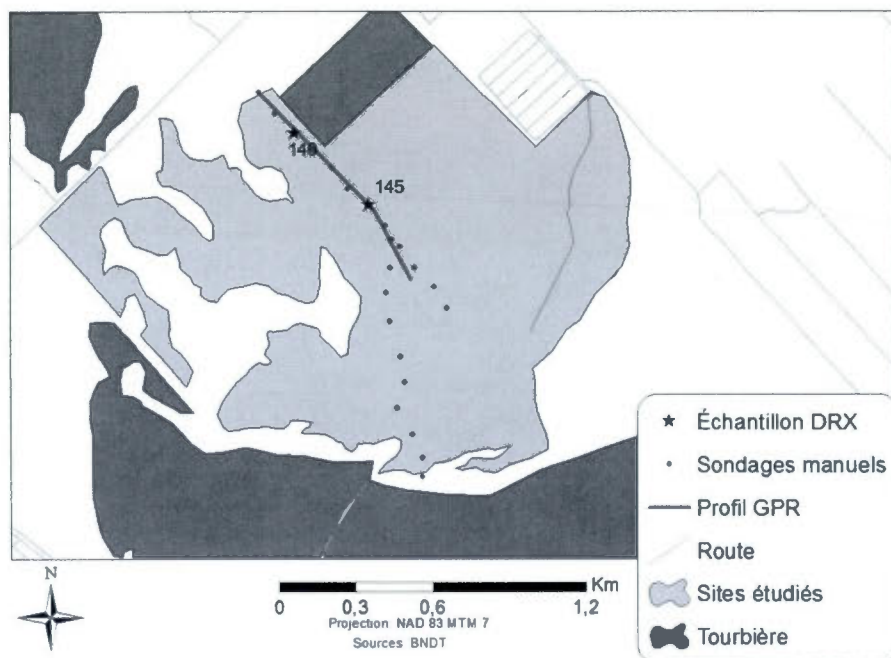


Figure 27-Tourbière de Francoeur : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

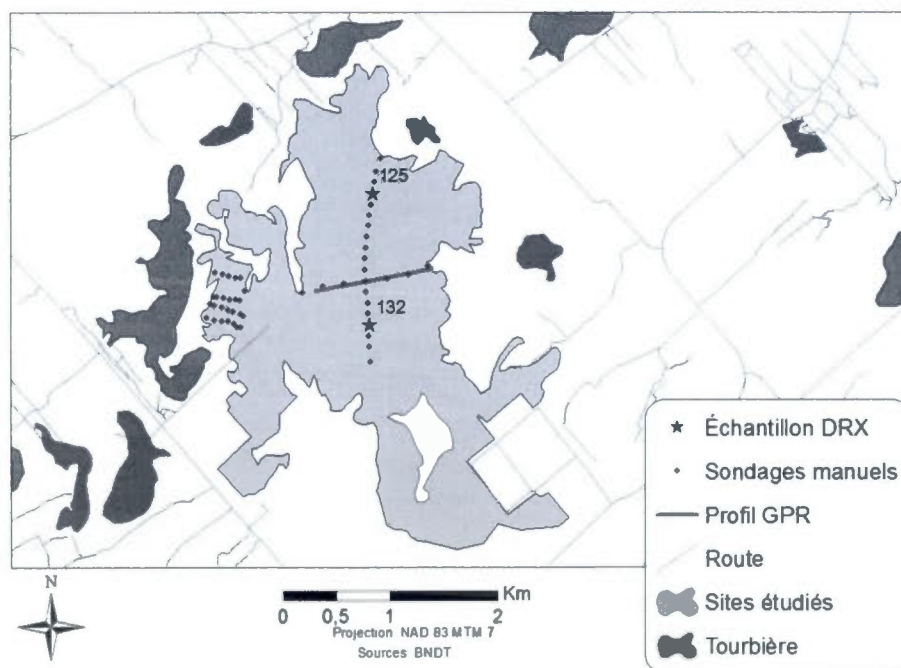


Figure 28-Tourbière de Lac Rose : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

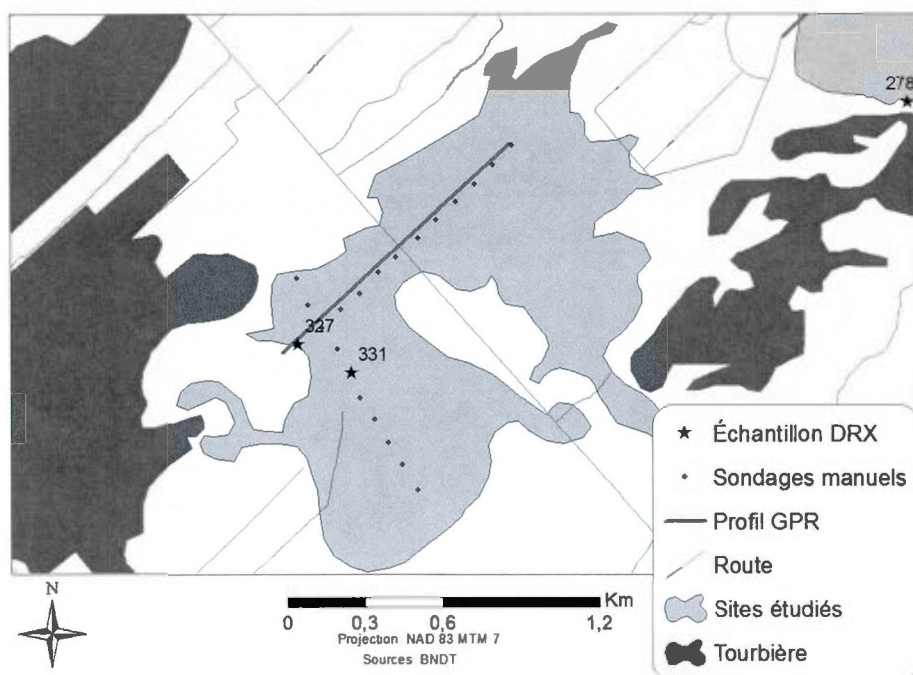


Figure 29-Tourbière de Lemieux : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

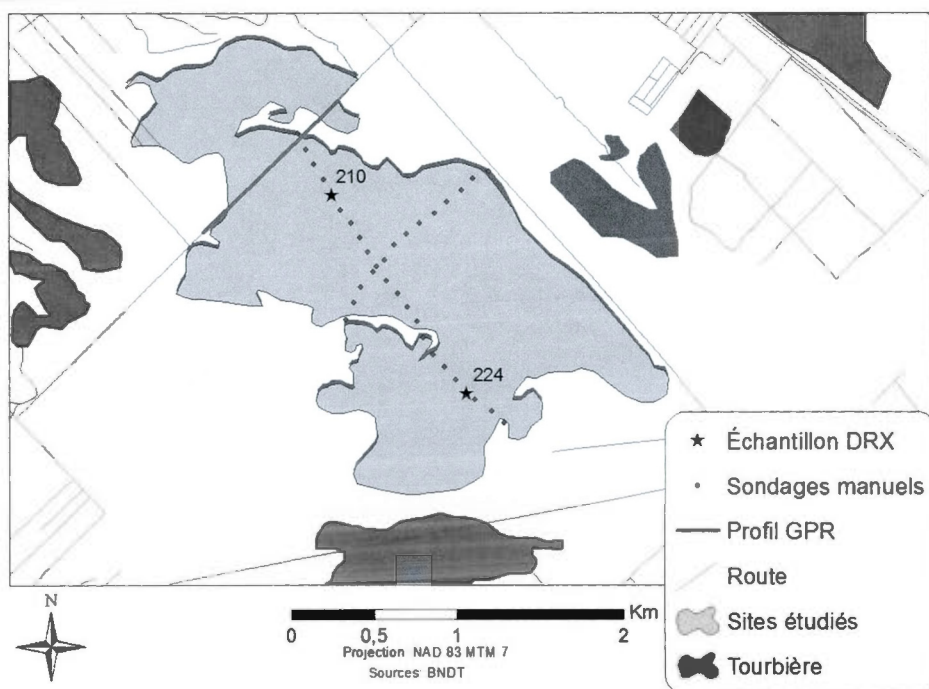


Figure 30-Tourbière de Mer Bleue : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

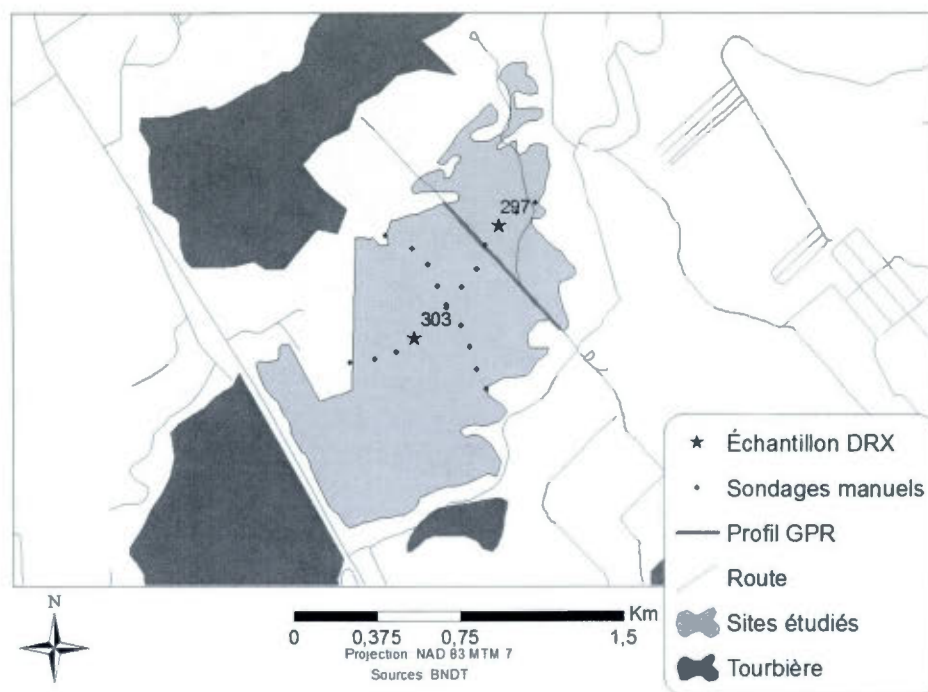


Figure 31-Tourbière de Plessis : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

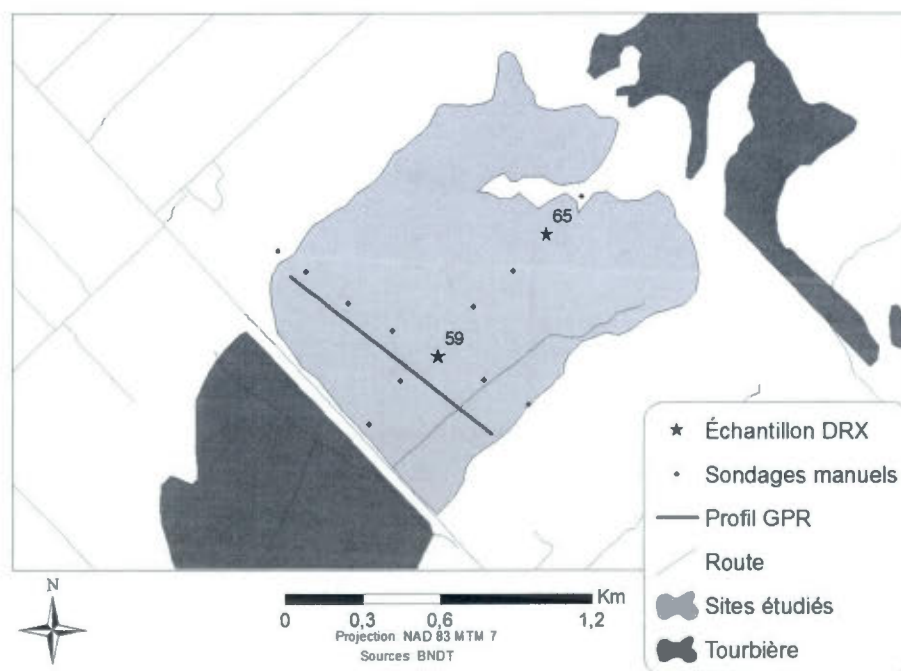


Figure 32-Tourbière de Saint-Sylvère : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

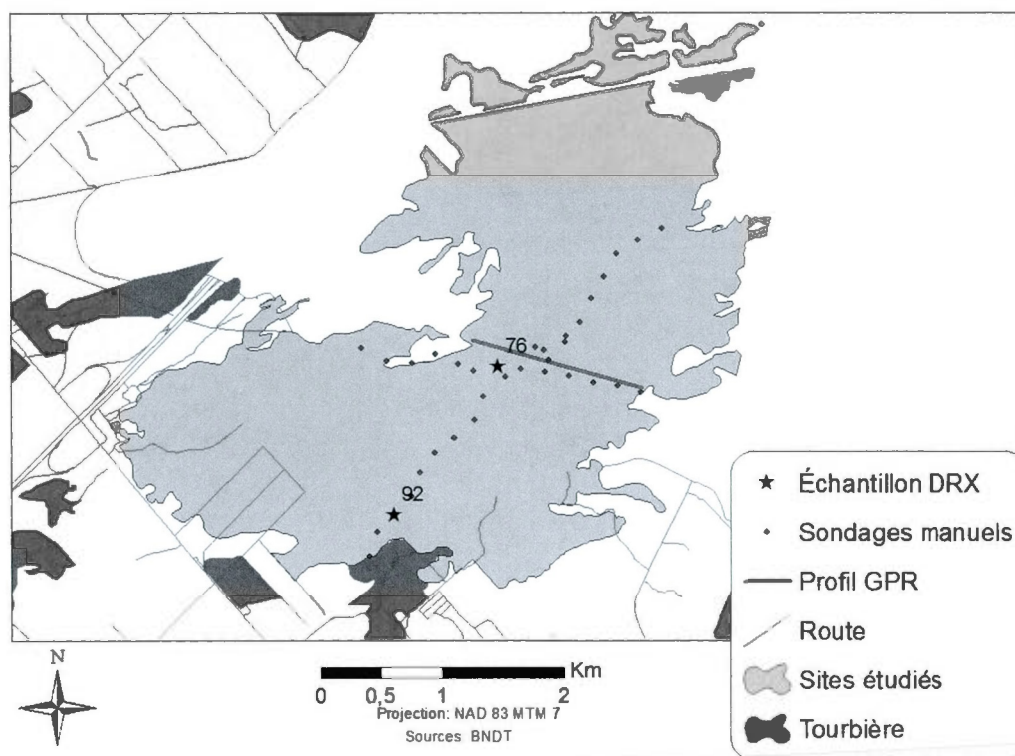


Figure 33-Tourbière de Villeroy : localisation des sondages manuels, des profils géoradar et des échantillons analysés aux rayons X

ANNEXE B

Coupes établies à l'aide des sondages manuels

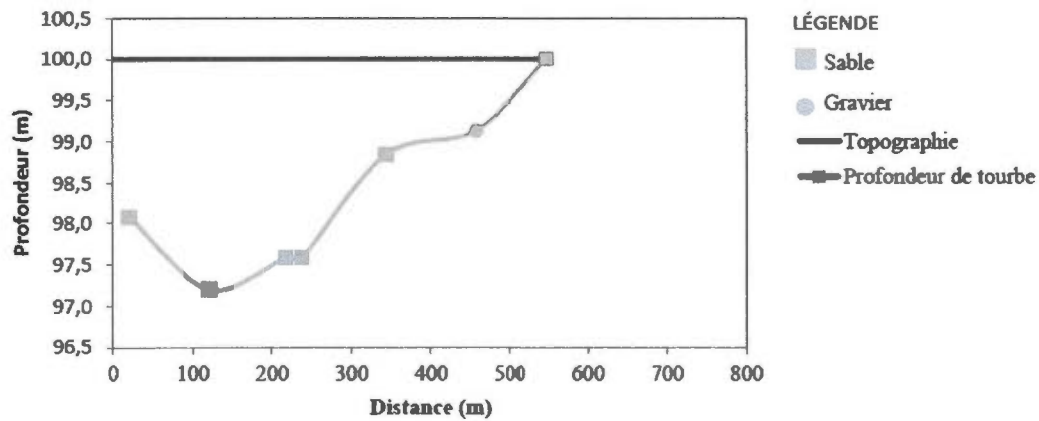


Figure 34-Profil A-A' de la tourbière de Blanford

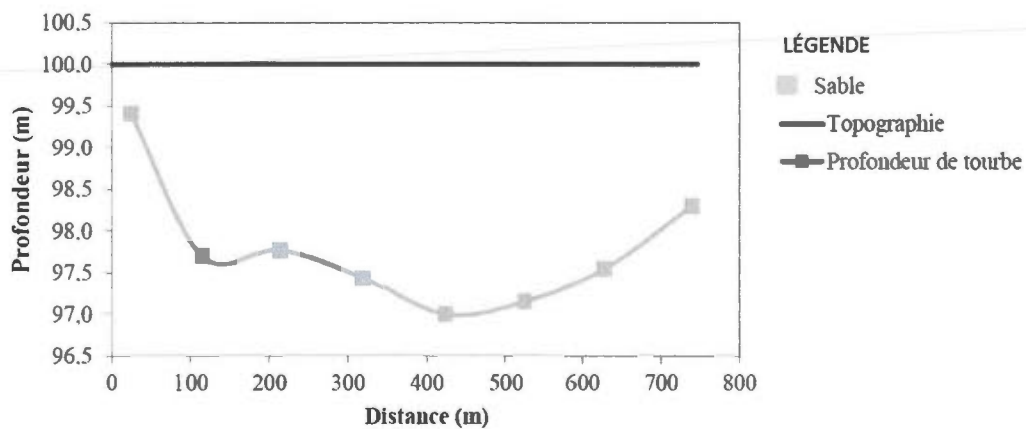


Figure 35-Profil B-B' de la tourbière de Blanford

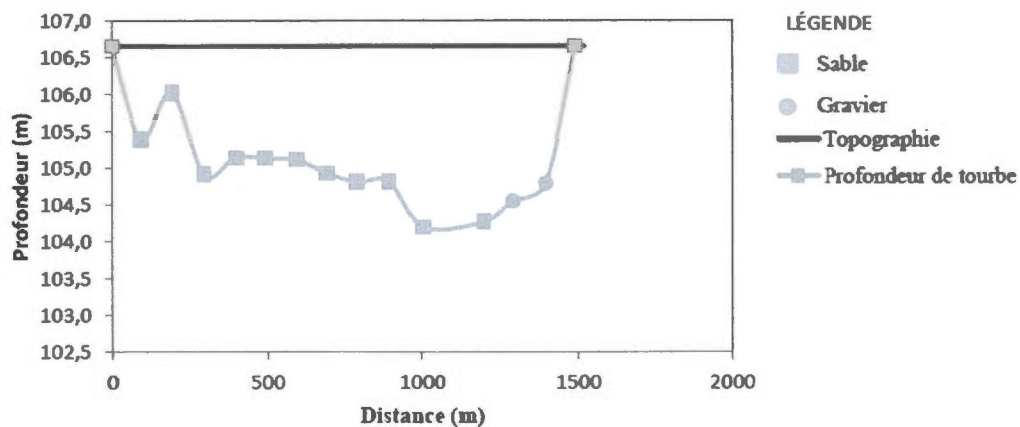


Figure 36-Profil A-A' de la tourbière de Defoy

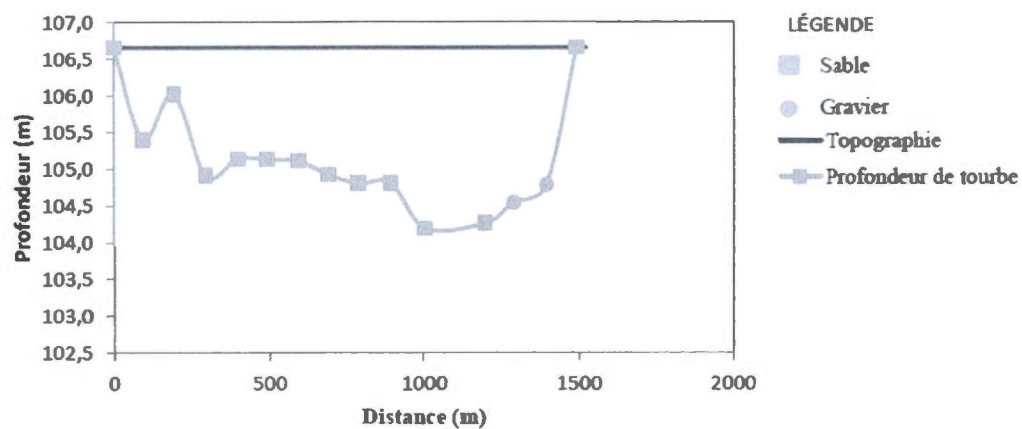


Figure 37-Profil B-B' de la tourbière de Defoy

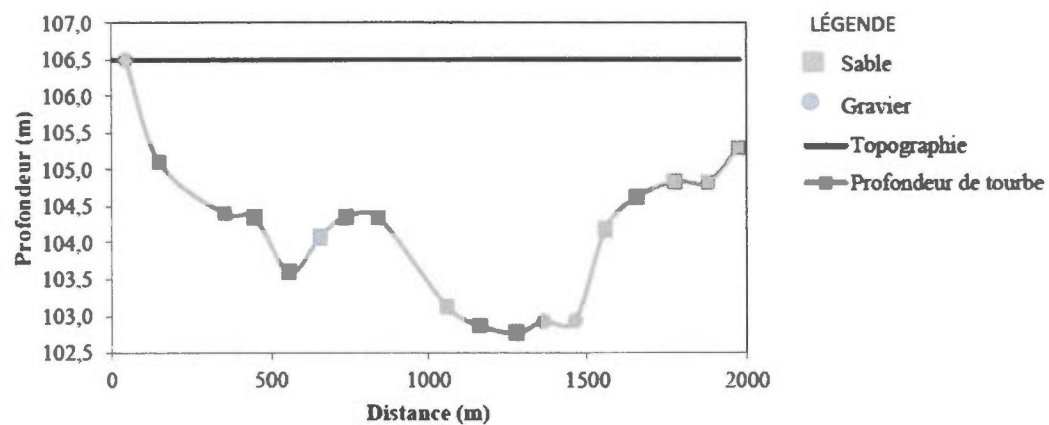


Figure 38-Profil A-A' de la tourbière de Francoeur

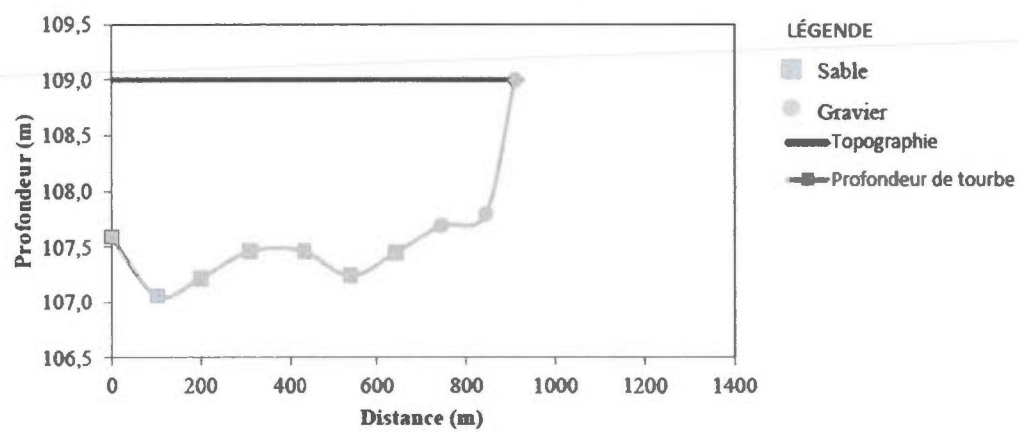


Figure 39-Profil B-B' de la tourbière de Francoeur

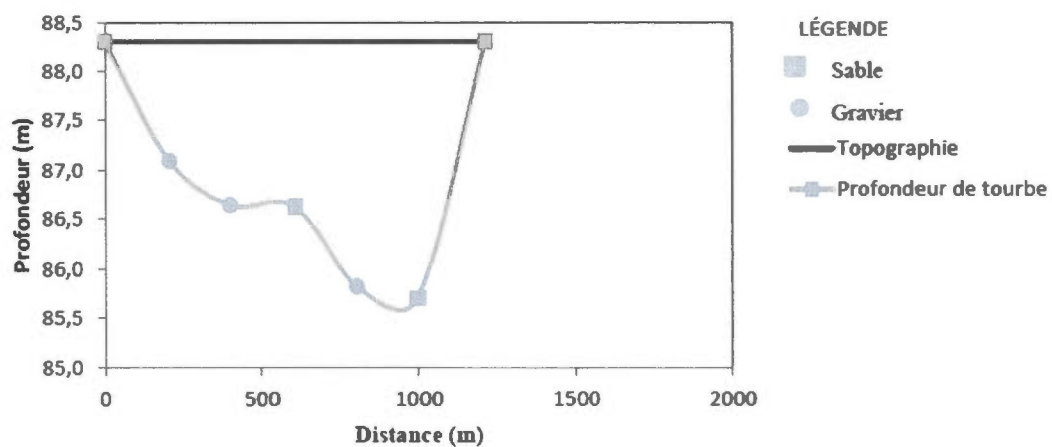


Figure 40- Profil A-A' de la tourbière du Lac Rose

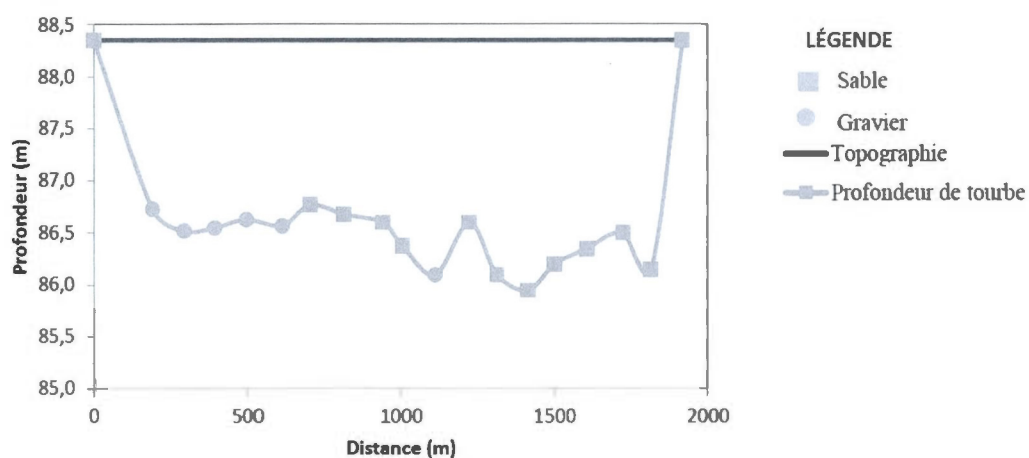


Figure 41-Profil B-B' de la tourbière du Lac Rose

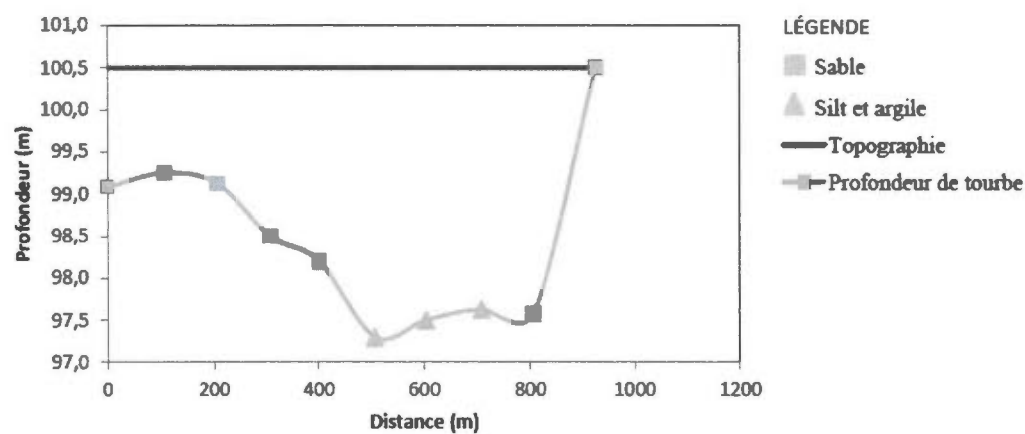


Figure 42-Profil A-A' de la tourbière de Lemieux

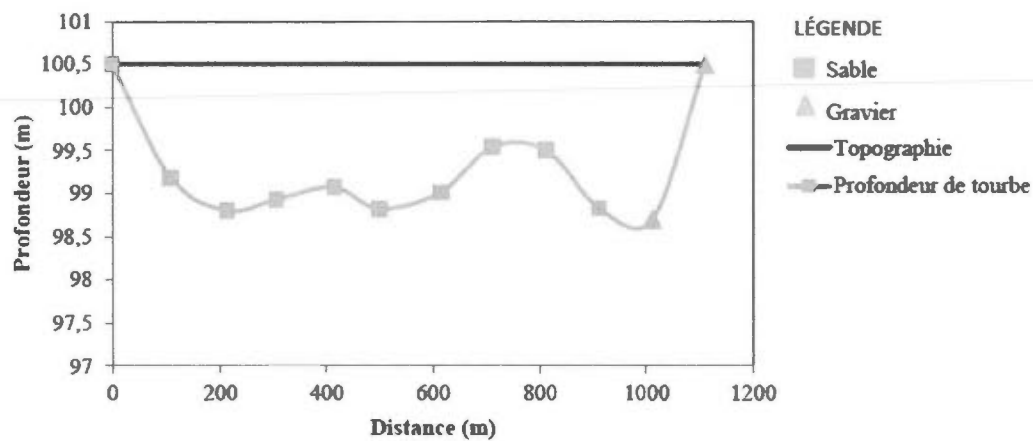


Figure 43-Profil B-B' de la tourbière de Lemieux

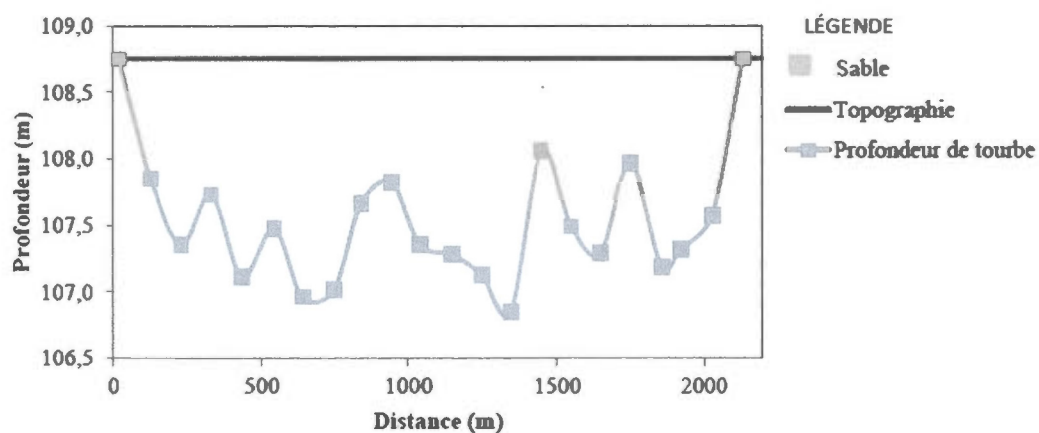


Figure 44-Profil A-A' de la tourbière de Mer Bleue

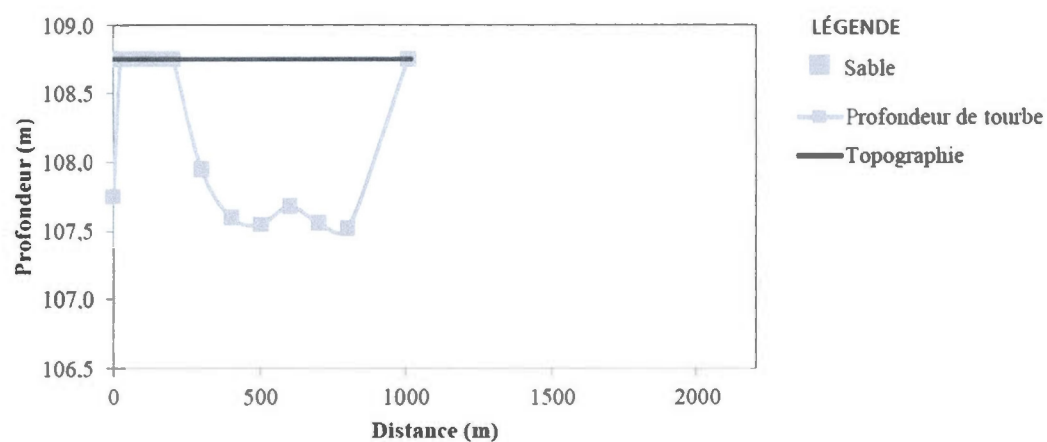


Figure 45-Profil B-B' de la tourbière de Mer Bleue

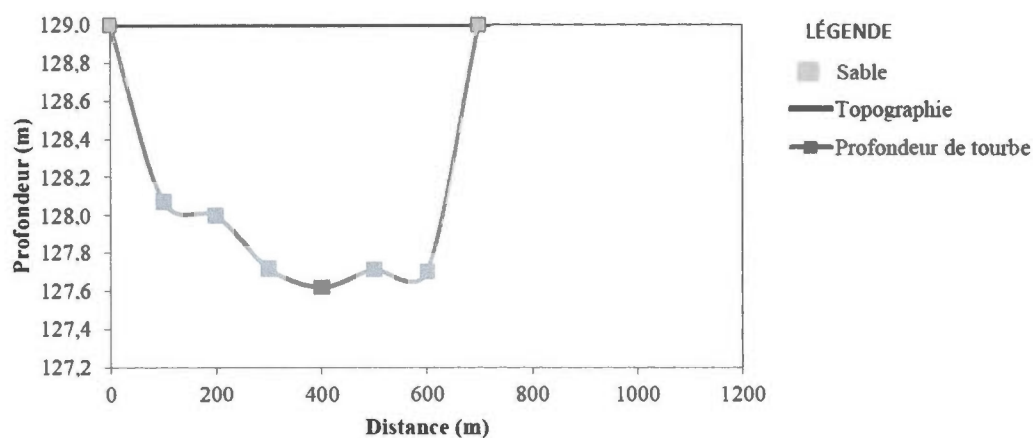


Figure 46-Profil A-A' de la tourbière de Plessis

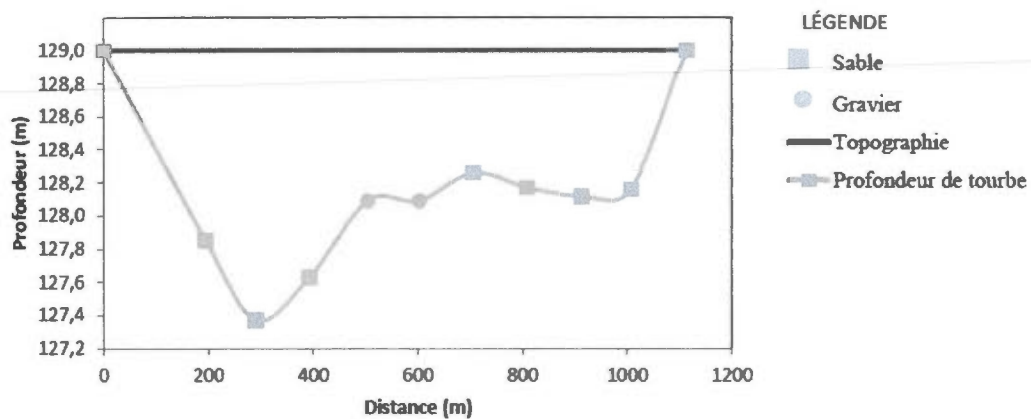


Figure 47-Profil B-B' de la tourbière de Plessis

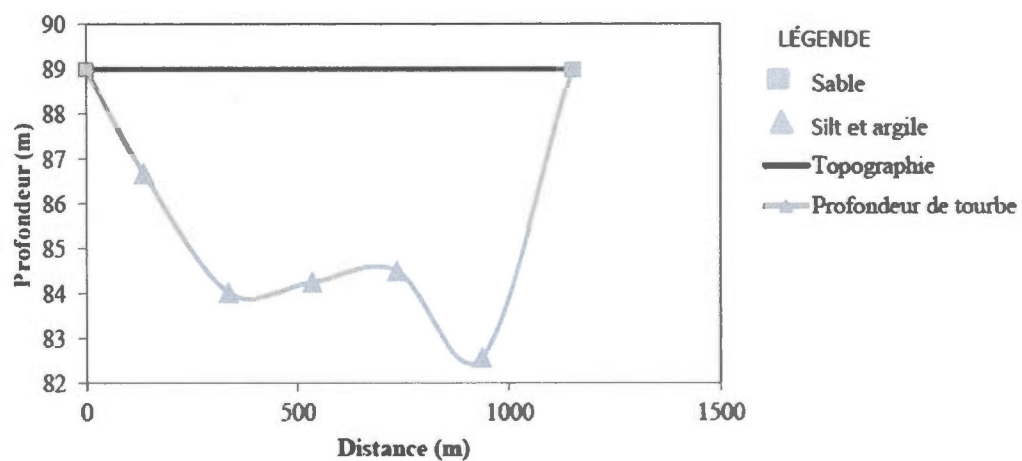


Figure 48-Profil A-A' de la tourbière de Saint-Sylvère

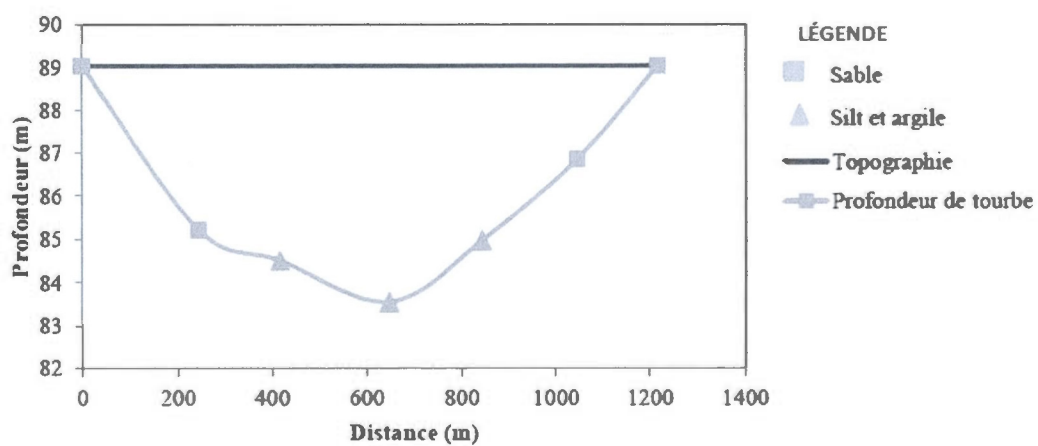


Figure 49-Profil B-B' de la tourbière de Saint-Sylvère

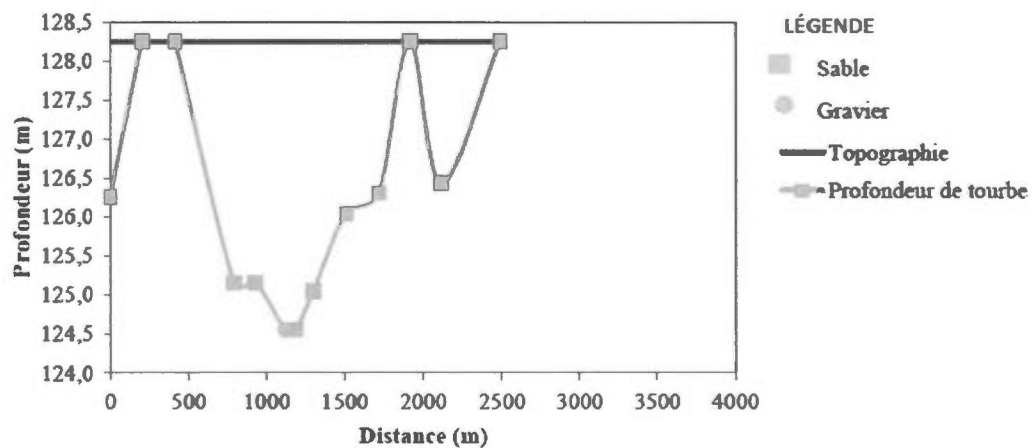


Figure 50-Profil A-A' de la tourbière de Villeroy

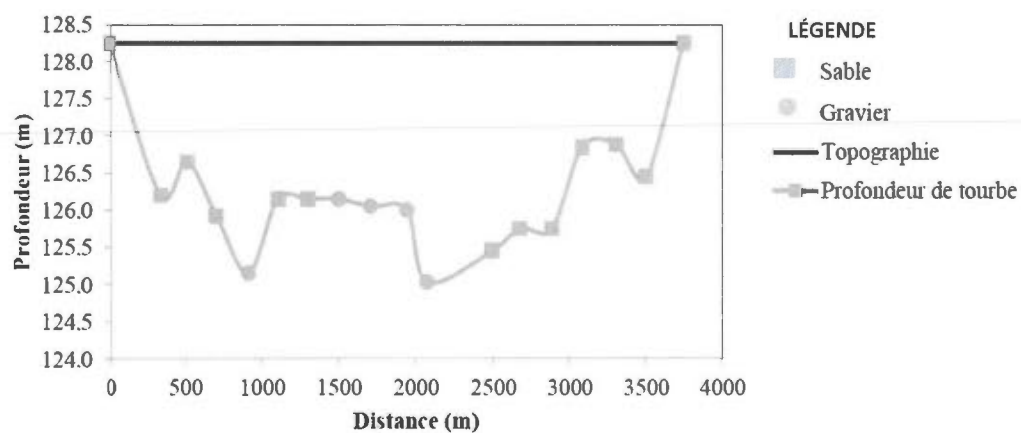


Figure 51-Profil B-B' de la tourbière de Villeroy

ANNEXE C

Profils géoradar

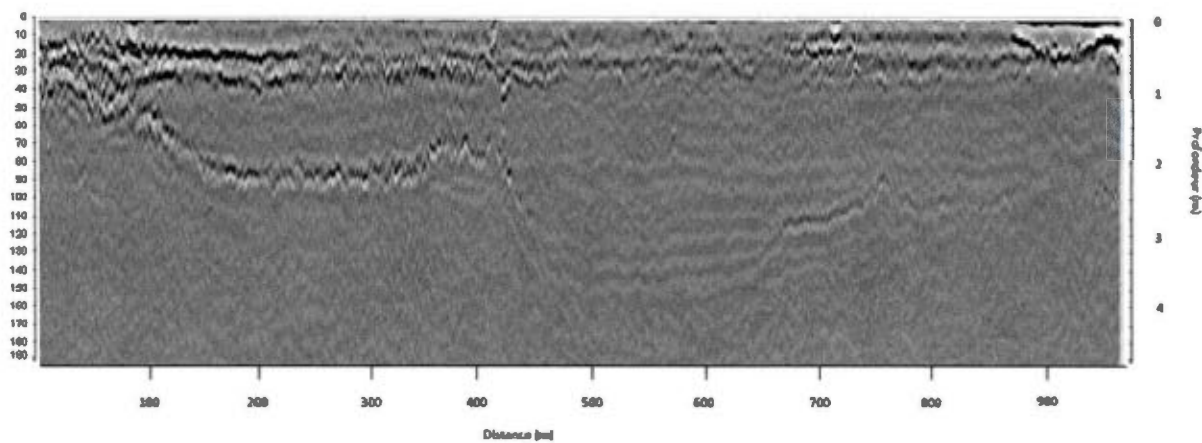


Figure 52-Blanford, profil géoradar brut

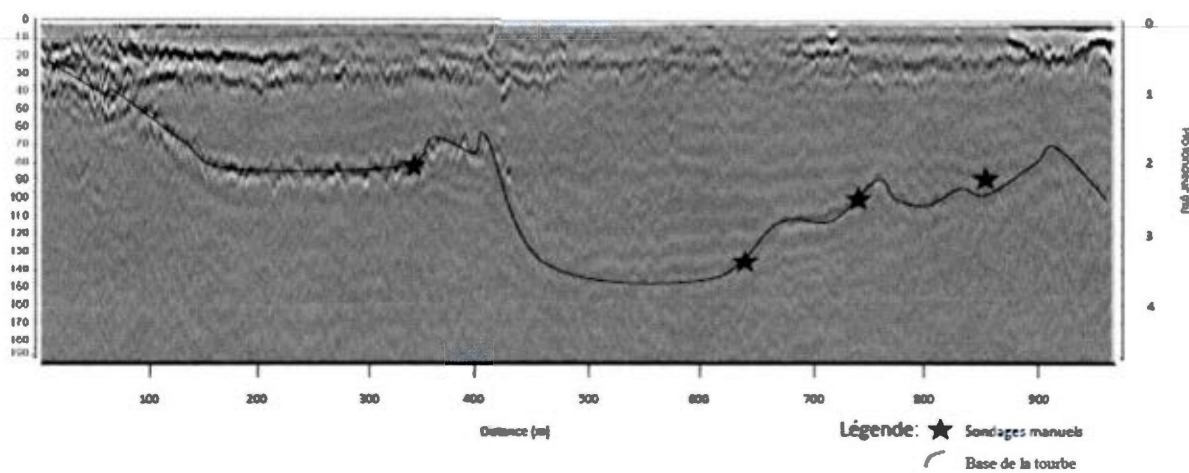


Figure 53-Blanford, profil géoradar interprété

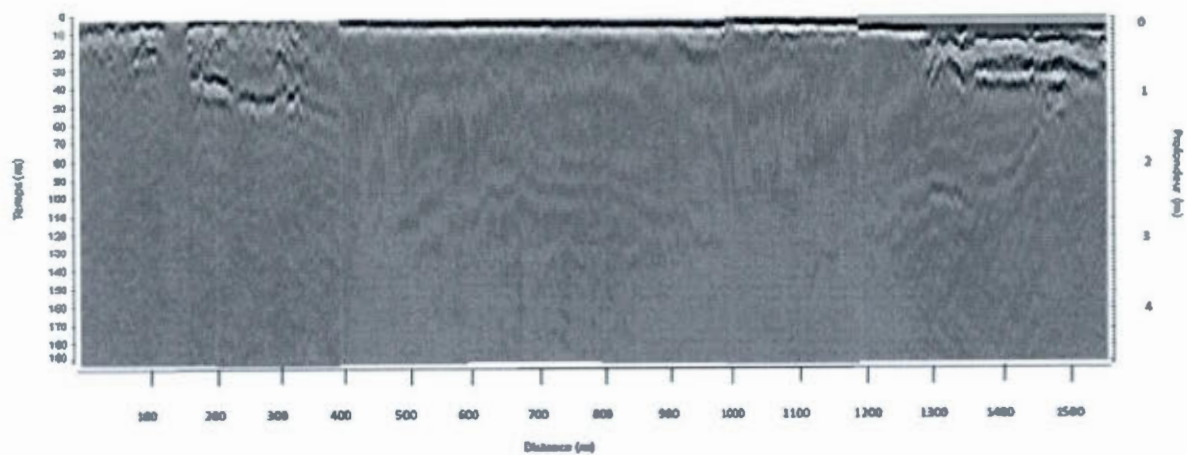


Figure 54-Defoy, profil géoradar brut

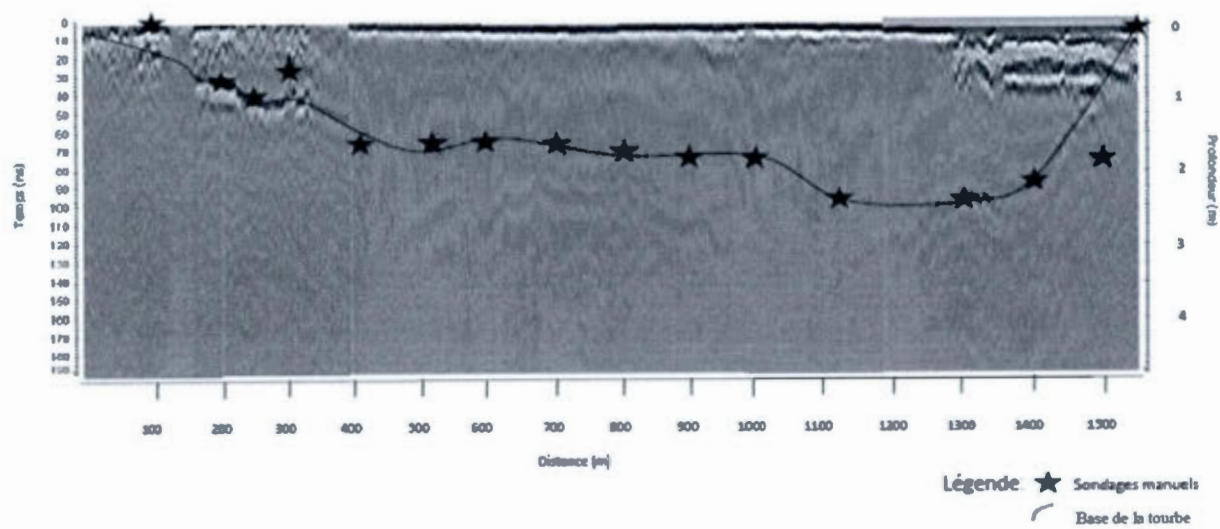


Figure 55-Defoy, profil géoradar interprété

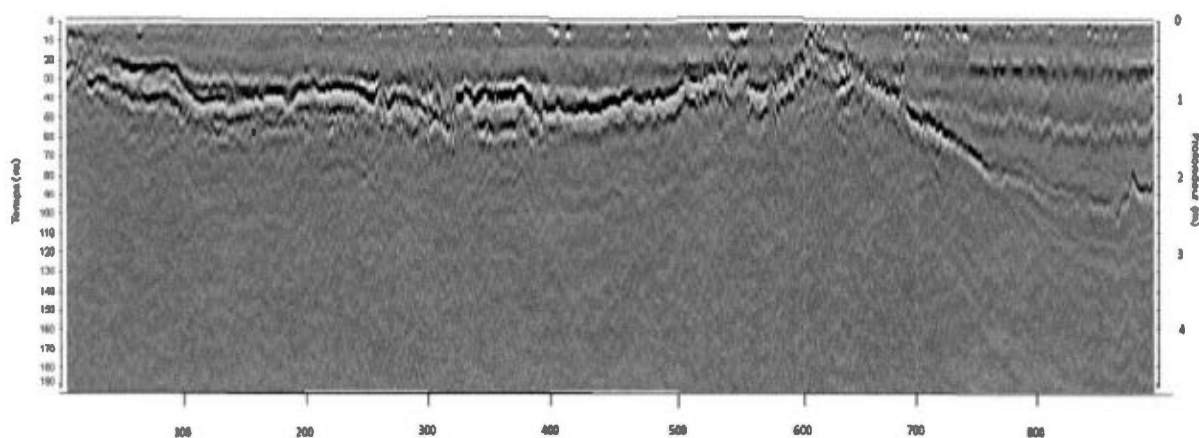


Figure 56-Francoeur, profil géoradar brut

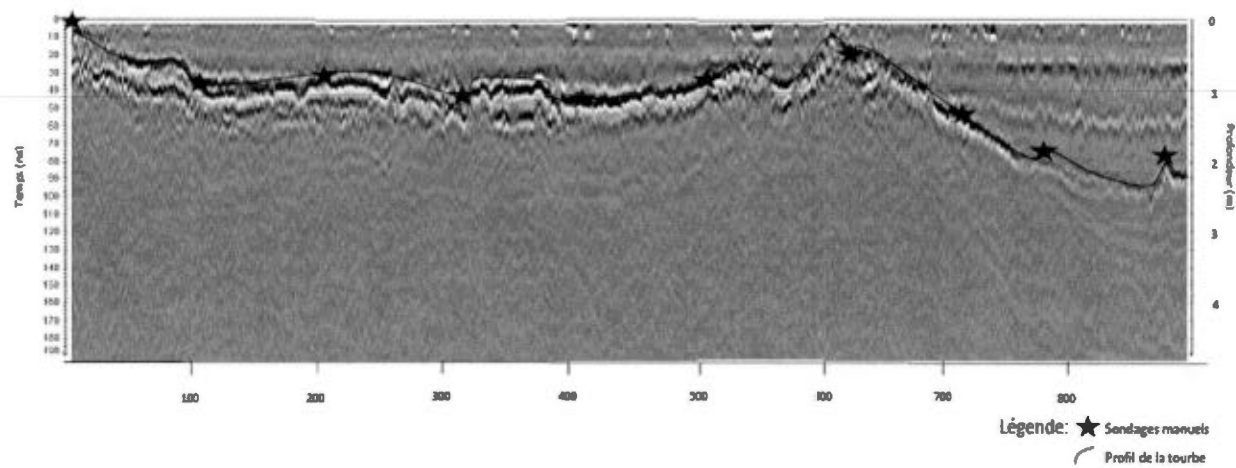


Figure 57-Francoeur, profil géoradar interprété

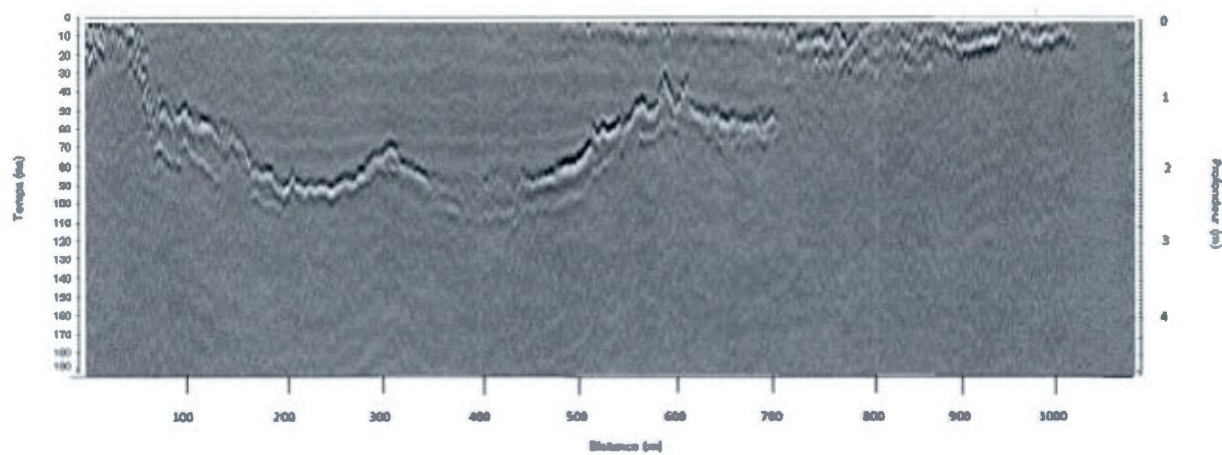


Figure 58-Lac Rose, profil géoradar brut

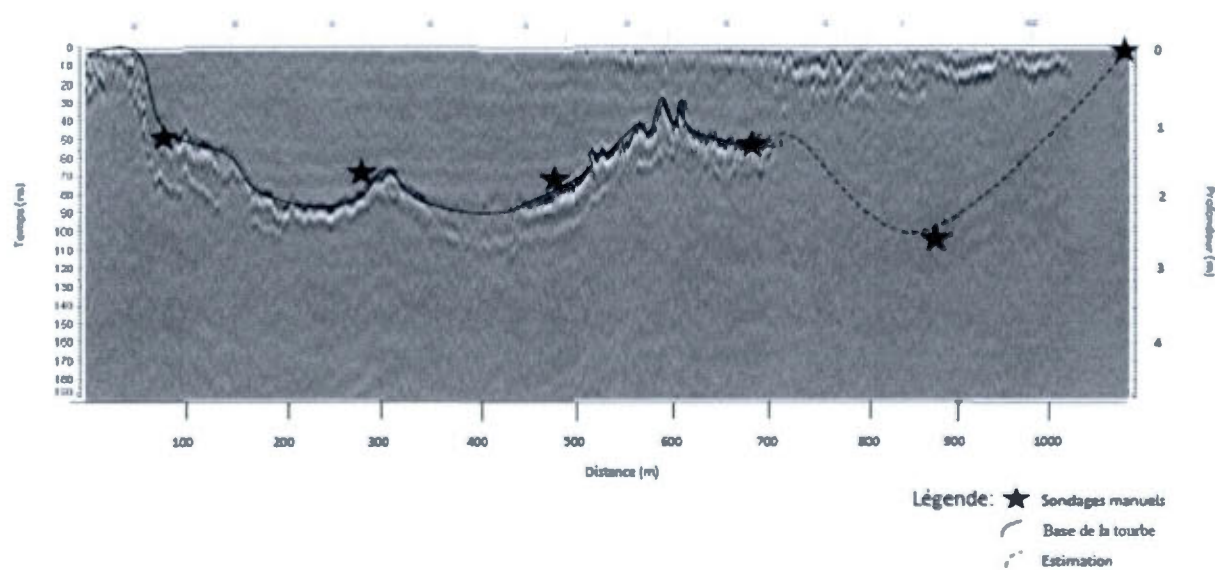


Figure 59-Lac Rose, profil géoradar interprété

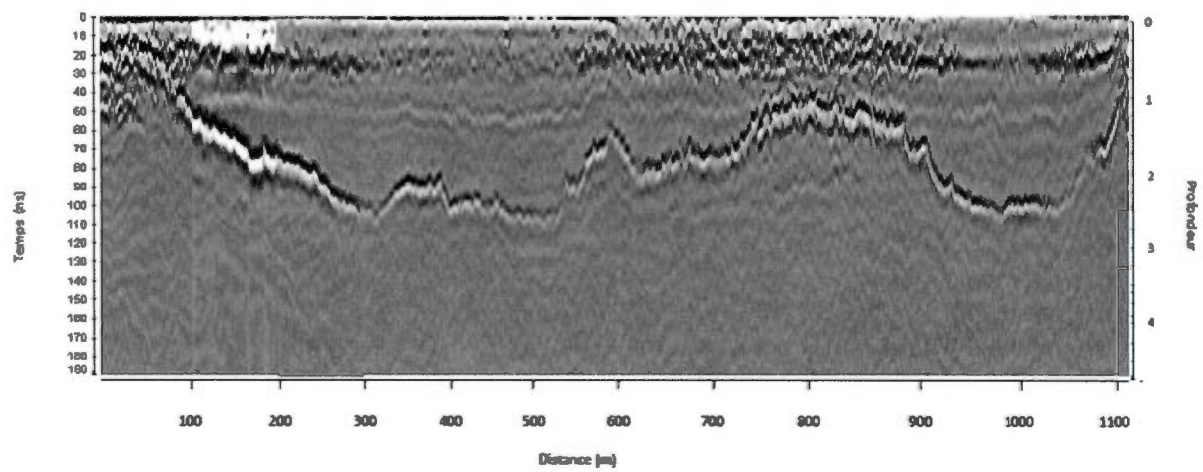


Figure 60-Lemieux, profil géoradar brut

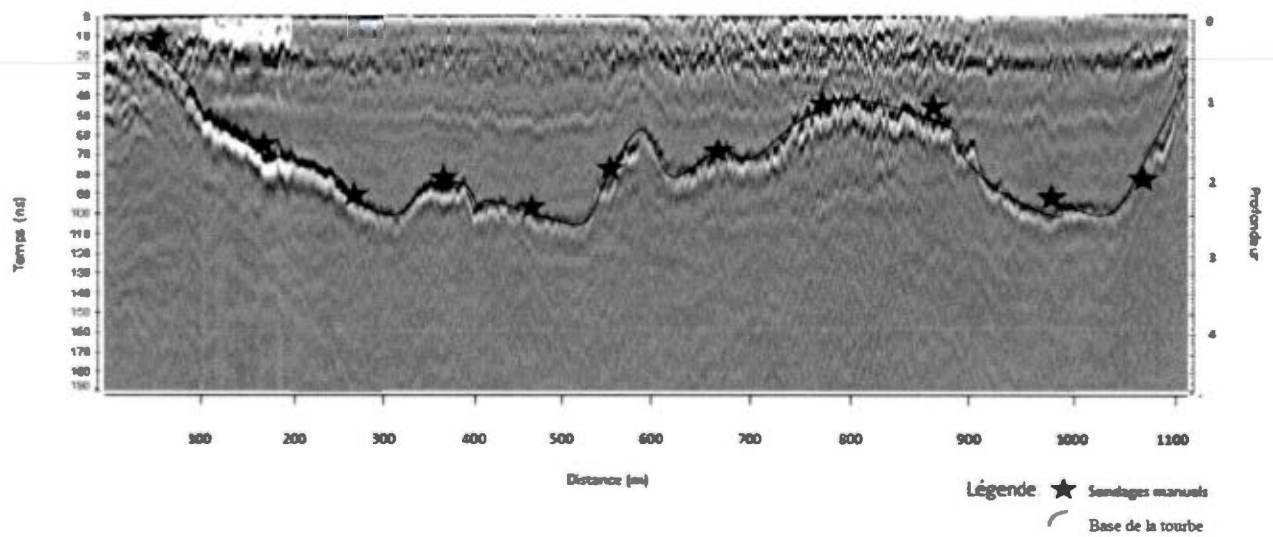


Figure 61-Lemieux, profil géoradar interprété

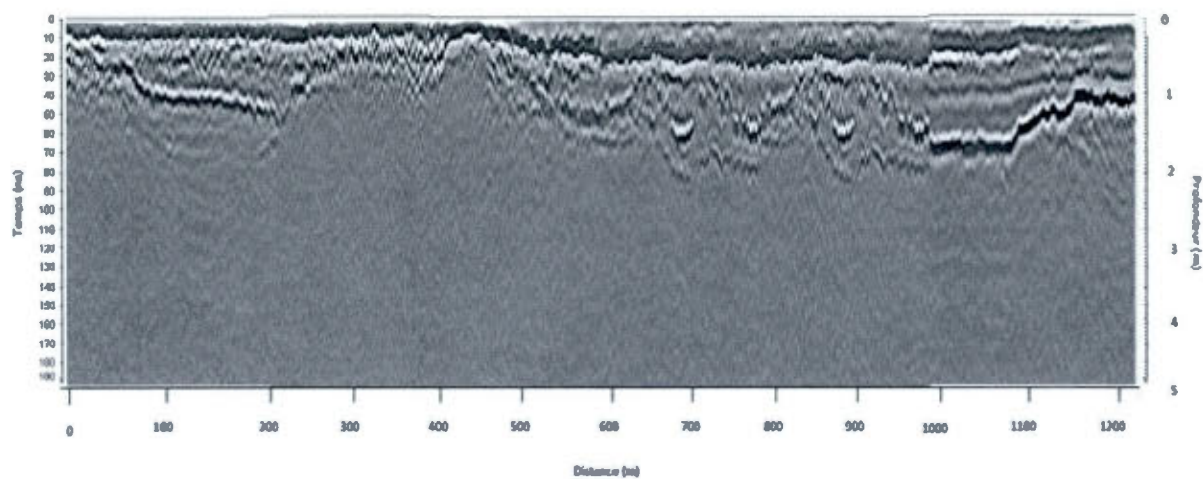


Figure 62-Mer Bleue, profil géoradar brut

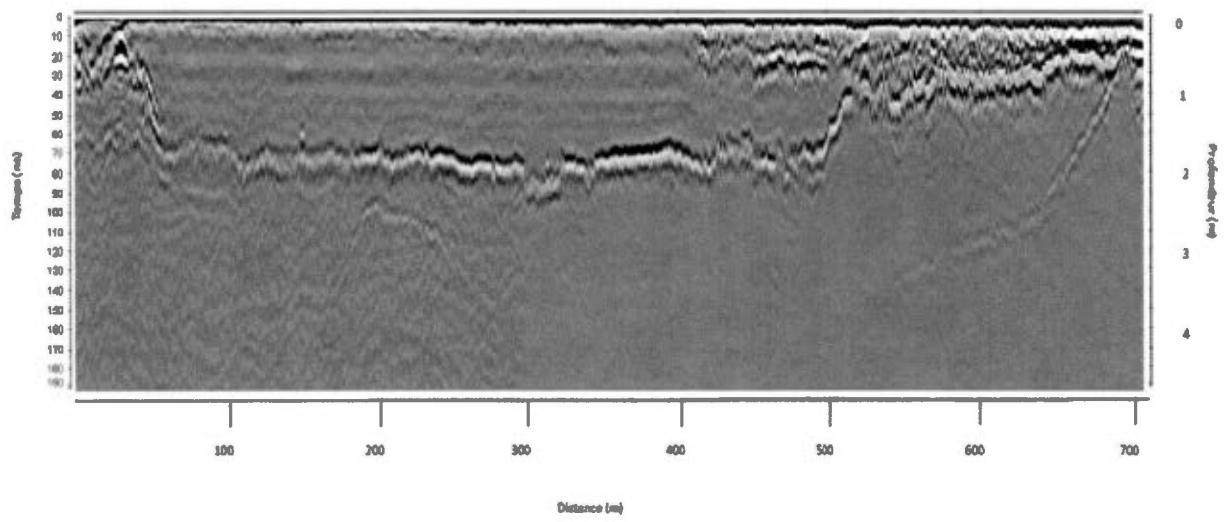


Figure 63-Plessis, profil géoradar brut

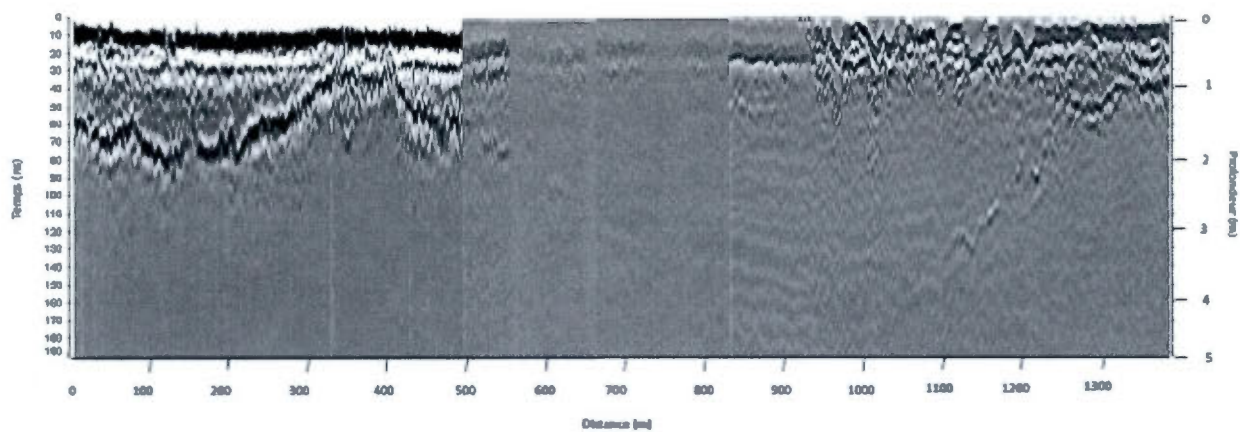


Figure 64-Villeroy, profil géoradar brut

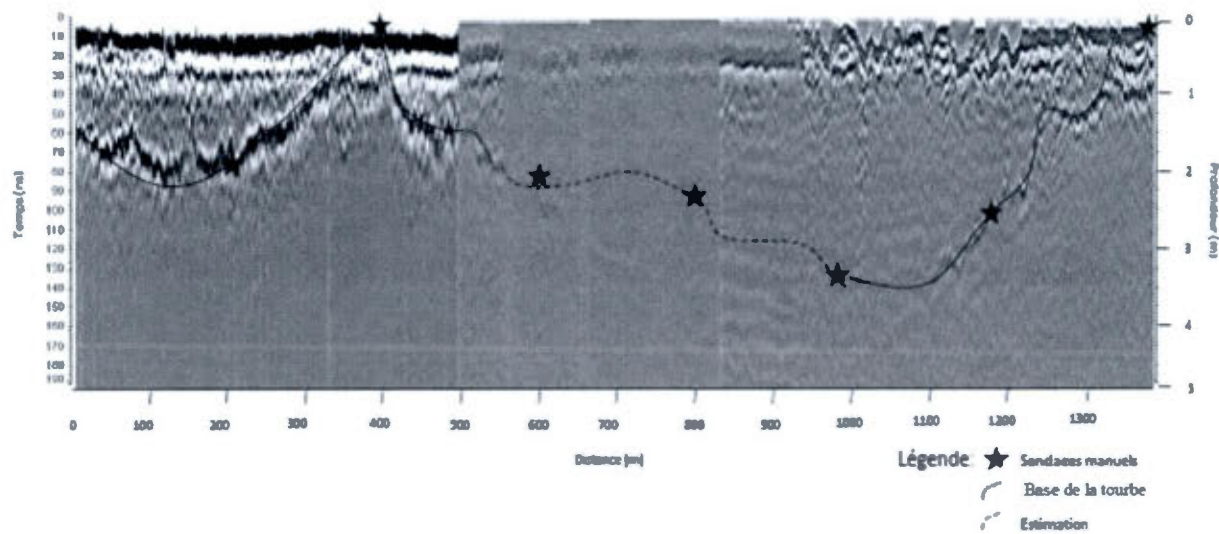


Figure 65-Villeroy, profil géoradar interprété

ANNEXE D

Analyse aux rayons X

Méthodologie

Les échantillons utilisés pour l'analyse granulométrique ont été réduits en poudre et placés sur des plaquettes circulaires, formant un plan parfaitement horizontal. Ils ont été analysés au diffractomètre et les diffractogrammes résultants ont été interprétés avec le logiciel Eva de la suite DIFFRAC^{plus}. La surface des pics a été mesurée et l'analyse semi-quantitative de la teneur de chacun des minéraux a été faite dans Excel.

Les résultats des analyses semi-quantitatives sont présentés sous forme de diagramme triangulaire à la figure 15. Les échantillons sont tous composés de quartz et de feldspath/plagioclase à plus ou moins 50%, avec une faible teneur en autres minéraux. Ces résultats ne permettent pas de distinguer les faciès litho-sédimentaires de chacun des échantillons, et il semble très improbable d'y arriver avec cette méthode.

Afin de comprendre si la composition des particules grossières et des sédiments plus fins sont différentes, les résultats des analyses semi-quantitatives ont été séparés (voir figures 16 et 17). Les deux diagrammes montrent encore une fois une tendance relativement uniforme. Il est possible de constater que les graviers ont une plus forte teneur en minéraux autres que le quartz, le feldspath et les plagioclases que les sédiments plus fins. Cette observation est probablement liée au fait que les minéraux "autres" ont une dureté moins importantes que le quartz, le feldspath et les plagioclases. Les processus d'érosion sont possiblement responsables de l'absence de ces "autres" minéraux dans les particules plus fines.

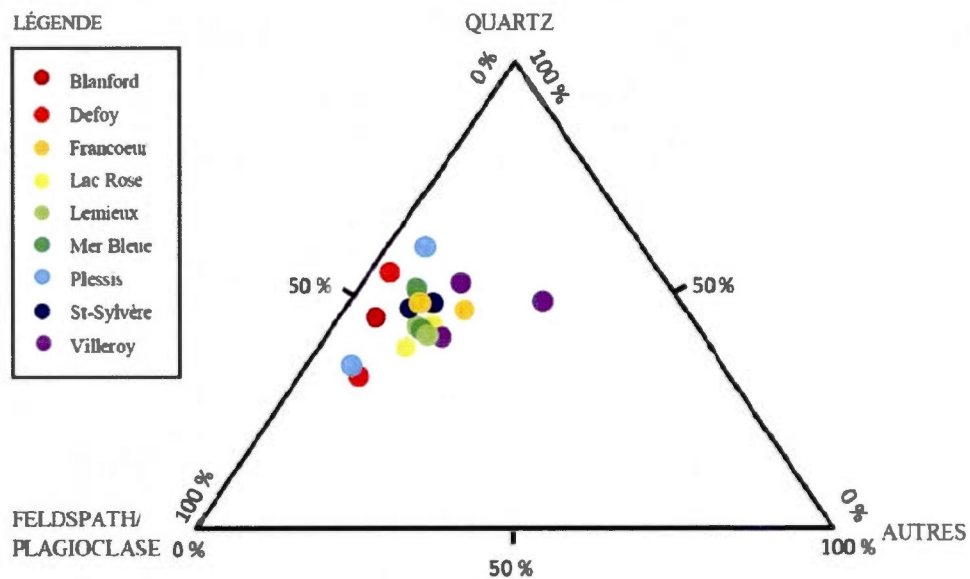


Figure 66-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, échantillon complet

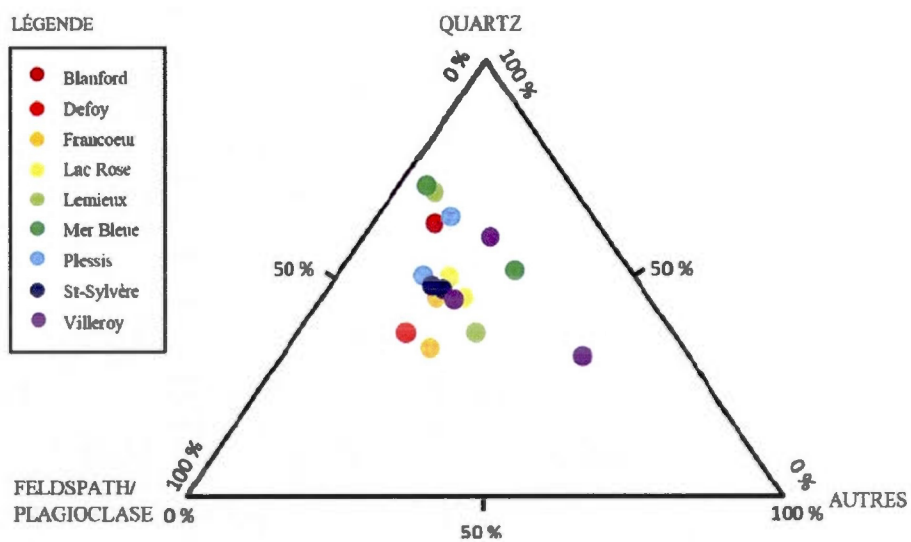


Figure 67-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, particules grossières

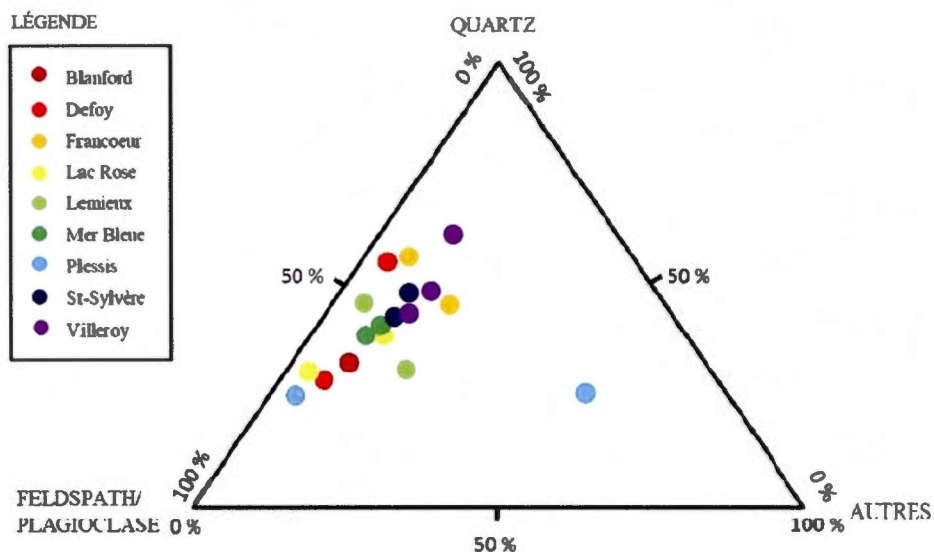


Figure 68-Résultats des analyses semi-quantitatives de la diffraction aux rayons X, sables, silts et argiles

L'analyse semi-quantitative des résultats de la diffraction aux rayons X n'est pas d'une précision absolue. Les variations de composition entre les différentes granulométries le prouvent. De plus, la difficulté d'identification des phases minérales et des erreurs de manipulation lors de la préparation des échantillons sont susceptibles d'augmenter les marges d'erreurs de résultats.

La connaissance de la nature du faciès du substrat d'une tourbière est nécessaire à la compréhension des échanges entre l'aquifère et la tourbière. La diffraction aux rayons X ne s'est pas avérée très utile pour y parvenir. La constitution similaire de plusieurs faciès litho-sédimentaires combinée à l'imprécision de la méthode semi-quantitative ne donnent pas de résultats concluants.

Tableau 8-Blanford, échantillon 278; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Blanford	28%	32%	40%
amphibole	5%	3%	0%
calcite	1%	0%	0%
chlorite	2%	1%	1%
f.alcalin	4%	44%	40%
hematite	1%	0%	0%
mica	2%	0%	1%
plagio	22%	21%	15%
pyroxene	1%	1%	1%
quartz	62%	29%	42%

Tableau 9-Defoy, échantillon 238; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Defoy	38%	45 %	17 %
amphibole	10%	1%	8%
calcite	1 %	0%	0%
chlorite	3 %	2%	1%
f.alcalin	4%	25%	38%
hematite	2 %	0%	0%
mica	2 %	1%	1%
plagio	41%	38%	26%
pyroxene	2%	2%	1%
quartz	34%	30%	24%

Tableau 10- Defoy, échantillon 257; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Defoy	48%	40%	12%
amphibole	n.d.	5%	1%
calcite	n.d.	0%	1%
chlorite	n.d.	1%	1%
f.alcalin	n.d.	10%	31%
hematite	n.d.	0%	1%
mica	n.d.	0%	1%
plagio	n.d.	22%	19%
pyroxene	n.d.	1%	1%
quartz	n.d.	61 %	44%

Tableau 11- Francoeur, échantillon 140; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Francoeur	38%	48%	14%
amphibole	17%	1%	2%
calcite	1%	1%	1%
chlorite	3%	1%	2%
f.alcalin	7%	6%	9%
hematite	1%	0%	2%
mica	2%	2%	1%
plagio	36%	13%	43%
pyroxene	1%	1%	2%
quartz	32%	75%	37%

Tableau 12-Francoeur, échantillon 145; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Francoeur	56%	38%	7%
amphibole	2%	2%	4%
calcite	1%	29%	1%
chlorite	5%	1%	1%
f.alcalin	18%	8%	17%
hematite	4%	0%	0%
mica	2%	1%	1%
plagio	14%	16%	24%
pyroxene	8%	1%	1%
quartz	46%	42%	51%

Tableau 13- Lac Rose, échantillon 125; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Lac Rose	69%	16%	15%
amphibole	6%	3%	1%
calcite	1%	1%	0%
chlorite	5%	2%	1%
f.alcalin	8%	10%	70%
hematite	9%	0%	0%
mica	2%	1%	0%
plagio	19%	43%	14%
pyroxene	3%	1%	1%
quartz	46%	39%	13%

Tableau 14- Lac Rose, échantillon 132; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Lac Rose	33%	43%	24%
amphibole	6%	3%	2%
calcite	4%	1%	1%
chlorite	4%	2%	2%
f.alcalin	7%	13%	19%
hematite	1%	1%	0%
mica	4%	2%	2%
plagio	19%	24%	35%
pyroxene	5%	12%	7%
quartz	50%	44%	32%

Tableau 15-Lemieux, échantillon 327; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Lemieux	26%	44%	30%
amphibole	22%	3%	1%
calcite	0%	0%	0%
chlorite	4%	0%	1%
f.alcalin	6%	23%	17%
hematite	1%	0%	1%
mica	4%	1%	2%
plagio	25%	23%	35%
pyroxene	1%	1%	1%
quartz	38%	48%	43%

Tableau 16- Lemieux, échantillon 331; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Lemieux	41%	38%	21%
amphibole	2%	6%	9%
calcite	1%	0%	2%
chlorite	2%	3%	5%
f.alcalin	11%	4%	36%
hematite	3%	1%	3%
mica	2%	3%	6%
plagio	7%	26%	34%
pyroxene	2%	3%	3%
quartz	69%	53%	2%

Tableau 17- Mer Bleue, échantillon 160; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Mer Bleue	56%	30%	14%
amphibole	3%	2%	2%
calcite	1%	1%	0%
chlorite	12%	4%	2%
f.alcalin	3%	26%	40%
hematite	1%	0%	3%
mica	8%	1%	1%
plagio	17%	25%	13%
pyroxene	2%	2%	5%
quartz	53%	38%	34%

Tableau 18- Mer Bleue, échantillon 210; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Mer Bleue	46%	33%	21%
amphibole	4%	12%	1%
calcite	0%	0%	1%
chlorite	3%	1%	2%
f.alcalin	5%	11%	47%
hematite	1%	0%	0%
mica	1%	1%	1%
plagio	16%	21%	17%
pyroxene	1%	1%	4%
quartz	70%	52%	28%

Tableau 19-Plessis, échantillon 297; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Plessis	61%	31%	8%
amphibole	2%	1%	1%
calcite	1%	0%	0%
chlorite	5%	1%	1%
f.alcalin	4%	15%	18%
hematite	0%	1%	0%
mica	3%	0%	0%
plagio	18%	34%	5%
pyroxene	3%	0%	1%
quartz	64%	49%	73%

Tableau 20- Plessis, échantillon 303; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Plessis	76%	19%	5%
amphibole	3%	1%	0%
calcite	1%	0%	0%
chlorite	7%	1%	1%
f.alcalin	6%	17%	39%
hematite	0%	1%	0%
mica	2%	1%	0%
plagio	31%	54%	32%
pyroxene	1%	4%	0%
quartz	48%	20%	27%

Tableau 21-Saint-Sylvère, échantillon 59; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Saint-Sylvère (59)	6%	85%	9%
amphibole	8%	4%	3%
calcite	1%	0%	1%
chlorite	2%	2%	3%
f.alcalin	20%	17%	20%
hematite	1%	1%	1%
mica	4%	2%	2%
plagio	14%	15%	43%
pyroxene	3%	1%	1%
quartz	46%	58%	26%

Tableau 22- Saint-Sylvère, échantillon 65; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Saint-Sylvère	71%	29%	0%
amphibole	4%	4%	2%
calcite	1%	1%	2%
chlorite	4%	4%	4%
f.alcalin	5%	5%	12%
hematite	1%	1%	2%
mica	1%	1%	2%
plagio	34%	34%	24%
pyroxene	2%	3%	2%
quartz	47%	47%	50%

Tableau 23- Villeroy, échantillon 76; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Villeroy	70%	30%	0%
amphibole	5%	1%	3%
calcite	1%	1%	2%
chlorite	8%	7%	8%
f.alcalin	6%	4%	13%
hematite	1%	1%	1%
mica	5%	5%	7%
plagio	16%	13%	37%
pyroxene	1%	2%	1%
quartz	58%	66%	28%

Tableau 24-Villeroy, échantillon 92; résultats de la diffraction aux rayons X

	Graviers	Sables	Silt-argile
Villeroy	64%	21 %	15%
amphibole	10%	5%	6%
calcite	4%	6%	2%
chlorite	2%	1%	1%
f.alcalin	8%	11%	22%
hematite	1%	1%	0%
mica	2%	1%	1%
plagio	29%	41%	15%
pyroxene	3%	2%	2%
quartz	42%	32%	51%

ANNEXE E

Cartes piézométriques détaillées et segments utilisés pour le calcul des flux

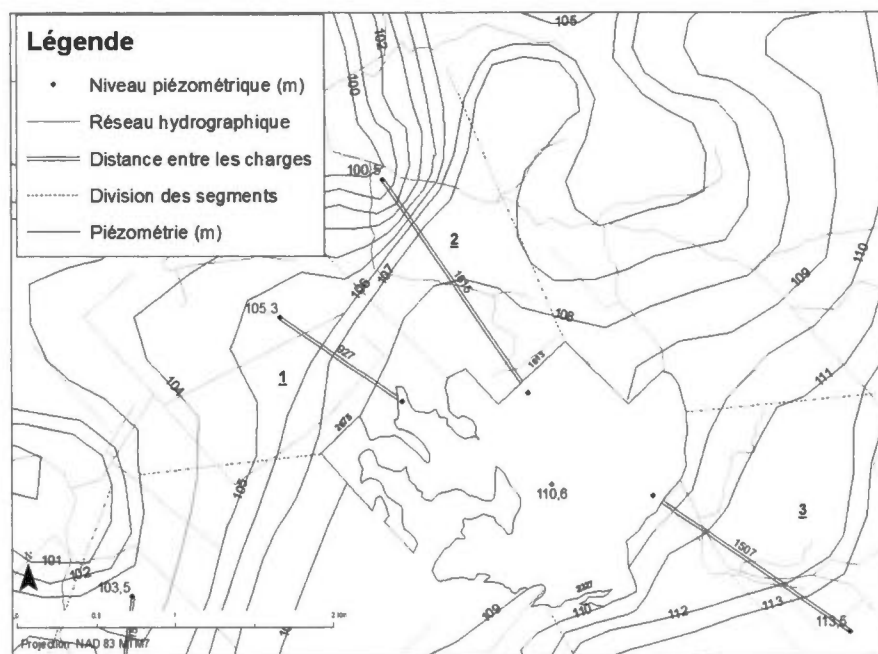


Figure 71-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Francoeur

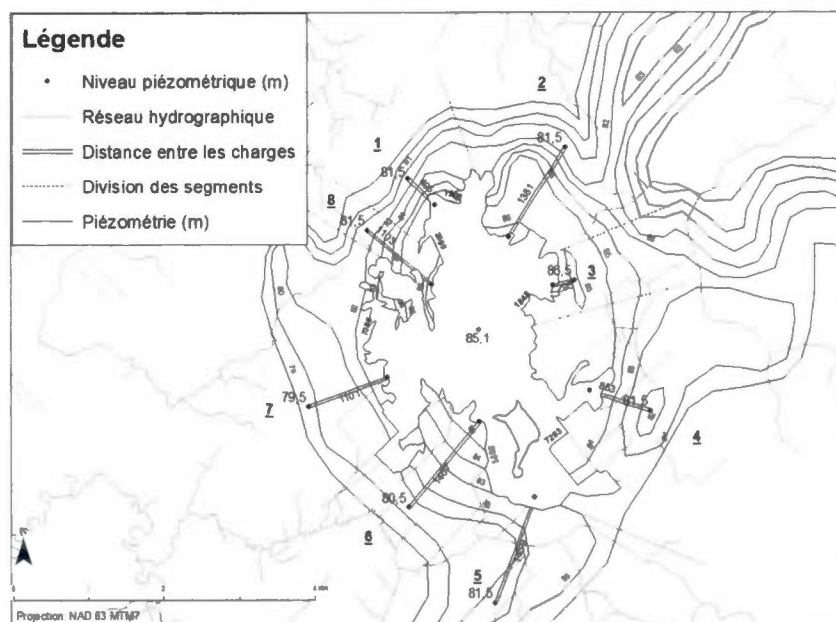


Figure 72-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Lac Rose



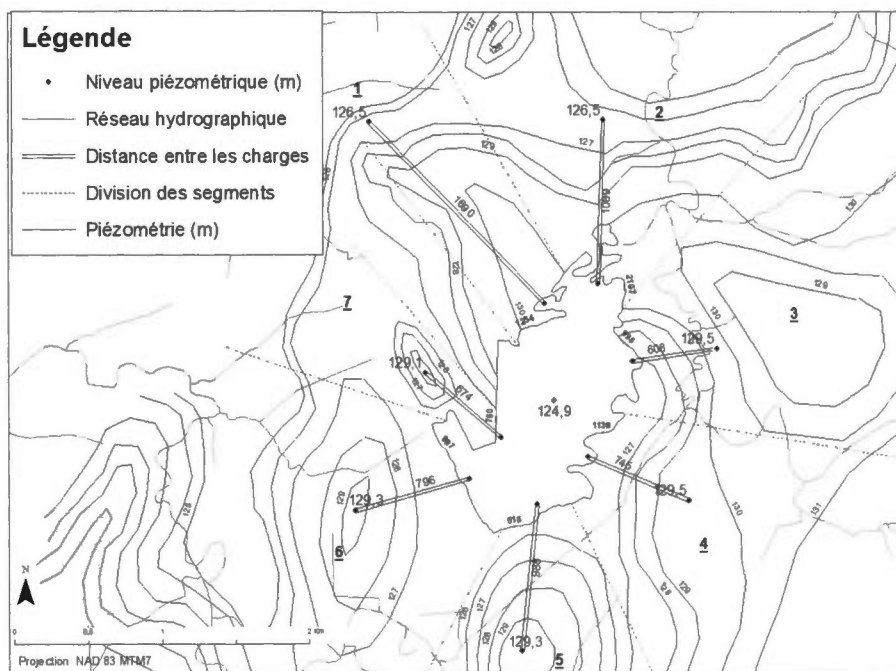


Figure 75-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Plessis

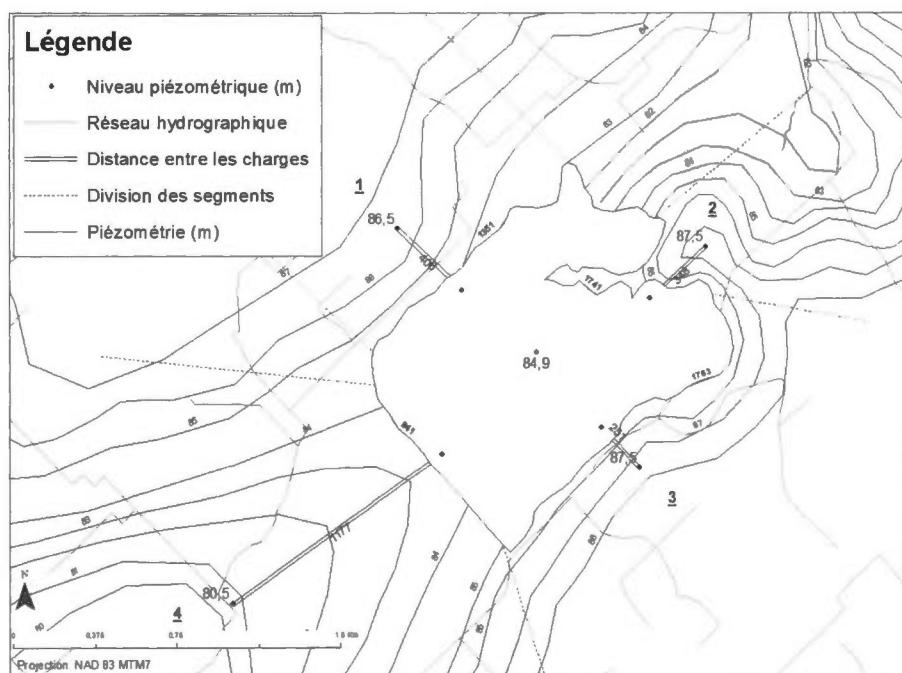


Figure 76-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Saint-Sylvere

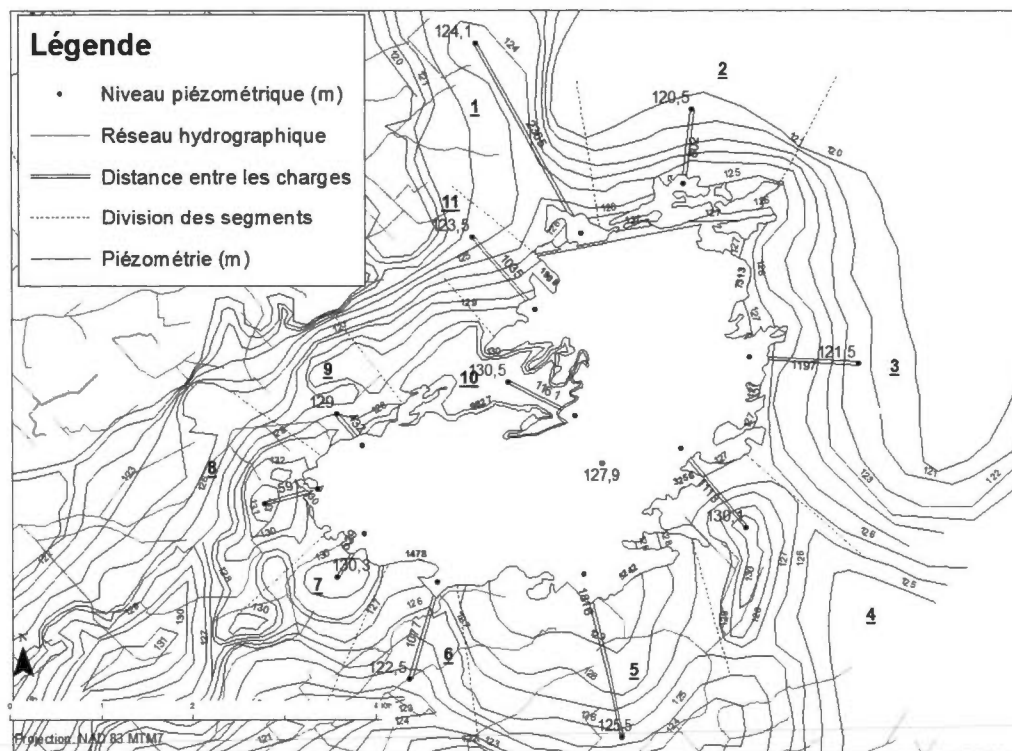


Figure 77-Carte piézométrique détaillée et approche segmentée, Villeroy

ANNEXE F

Flux de Darcy pour chacune des neuf tourbières étudiées

	A _{acrotelme} (m ²)	A _{catotelme} (m ²)	Δ H (m)	L (m)	Flux min (m3/j)	Flux max (m3/j)
Blanford						
Segment 1	186,8	672,48	0,4	412	1,39	4,08
Segment 2	560	2016	10,4	1434	31,08	91,40
Segment 3	494	1778,4	3,9	243	54,46	178,43
				TOTAL	86,93	273,91
Defoy						
Segment 1	676,8	2470,3	17,4	1773	45,75	144,41
Segment 2	671,6	2451,3	-4,1	1213	31,08	-51,11
Segment 3	1243,2	4537,7	8,9	1771	54,46	140,67
Segment 4	1283,6	4685,1	1,2	1764	6,69	19,66
Segment 5	510,4	1863	7,7	1443	20,87	61,32
Segment 6	1112	4058,8	-0,1	1425	-0,60	-1,76
				TOTAL	158,25	313,19
Francoeur						
Segment 1	1070	2514,5	-5,3	927	-45,15	-136,02
Segment 2	405,2	952,2	-10,1	1615	-56,34	-56,34
Segment 3	930,8	2187,4	2,9	1507	88,26	88,26
				TOTAL	-13,23	-104,10
Lac Rose						
Segment 1	763,2	2327,8	-3,6	495	-43,36	-115,21
Segment 2	1140,8	3479,4	-3,6	1381	-23,23	-61,73
Segment 3	739,2	2254,6	1,4	295	31,45	83,56
Segment 4	2917,2	8897,5	-3,6	853	-96,18	-255,55
Segment 5	2028,4	6186,6	-3,6	1459	-39,10	-103,89
Segment 6	916,4	2795	-4,6	1467	-22,45	-59,64
Segment 7	2954,4	9010,9	-5,6	1101	-134,71	-357,92
Segment 8	2954,4	9010,9	-3,6	1103	-83,85	-227,07
				TOTAL		-1097,46
Lemieux						
Segment 1	316	955,9	-0,7	1118	-50,62	-133,06
Segment 2	475,2	1437,5	-0,7	1249	-27,12	-71,29
Segment 3	460,4	1392,7	2,8	618	31,99	84,10
Segment 4	1468	4440,7	-0,2	1965	-112,27	-295,15
Segment 5	432	1306,8	5,3	910	-45,64	-119,98
Segment 6	344,4	1041,8	-0,7	2434	-26,20	-68,89
Segment 7	752,4	2276	6,3	2809	-137,03	-360,24
				TOTAL	-366,90	-964,51

Mer Bleue						
Segment 1	346	692	-6,2	1030	-17,53	-48,46
Segment 2	1389,2	2778,4	-5,7	1512	-27,12	-121,86
Segment 3	893,6	1787,2	2,8	618	34,07	94,21
Segment 4	1802,8	3605,6	0	707	0,00	0,00
Segment 5	745,6	1461,2	0	1074	0,00	0,00
TOTAL					-10,58	-76,11
Plessis						
Segment 1	501,6	877,8	1,6	1690	3,91	10,97
Segment 2	2107	2107	1,6	1089	22,62	63,39
Segment 3	398	696,5	4,6	608	55,01	154,14
Segment 4	455,2	796,6	4,6	745	23,17	64,92
Segment 5	206	360,5	4,4	988	7,56	21,19
Segment 6	398,8	697,9	4,4	796	18,17	50,92
Segment 7	304	532	4,2	674	15,62	43,75
TOTAL					146,07	409,27
Saint-Sylvère						
Segment 1	540,4	3431,5	1,6	406	0,33	0,81
Segment 2	696,4	4422,1	2,6	348	0,82	1,97
Segment 3	705,2	4478	2,6	251	1,15	2,76
Segment 4	376,4	2390,1	-4,4	1177	-0,22	-0,53
TOTAL					2,08	5,00
Villeroy						
Segment 1	822	2938,7	-3,8	2365	-11,84	-31,46
Segment 2	1150,4	4112,7	-7,4	802	-95,16	-252,82
Segment 3	2925,2	10457,6	-6,4	1197	-310,74	-785,75
Segment 4	1302,4	4656,1	2,2	1113	51,15	135,90
Segment 5	2096,8	7496,1	-2,4	1816	-24,84	-66,00
Segment 6	591,2	2113,5	-5,4	1077	-26,57	-70,60
Segment 7	454	1623,1	2,4	539	18,12	48,15
Segment 8	687,2	2456,7	3,3	591	76,24	202,55
Segment 9	461,2	1648,8	1,1	432	23,33	61,99
Segment 10	3930,8	14052,6	2,6	1161	174,89	464,68
Segment 11	763,2	2728,4	-4,4	1035	-29,09	-77,28
TOTAL					-154,50	-370,65

RÉFÉRENCES

- Avard K. et M. Larocque, 2011. Rôle hydrogéologique des tourbières sur l'aquifère du bassin versant de la rivière Bécancour, Conférence Géohydro 2011 AIH-CNC, Québec, 28-31 août 2011, 5 p.
- Avard K., M. Larocque et S. Pellerin, 2013. Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966 et 2010, *Le Naturaliste canadien*, 137(1): 8-15.
- Bedford B.L., 1999. Cumulative effects on wetland landscape; links to wetlands restoration in the United States and southern Canada, *Wetlands*, 19: 775-788.
- Base Nationale de Données Topographiques, 2009. Couverture du sol Circa 2000, Centre d'information topographique du secteur des Sciences de la Terre, Ressources Naturelles Canada, 1 carte.
- Buteau P. 1996a. Inventaire des tourbières de la région des Bois-Francs (31I/01), Ministère des Ressources Naturelles, Rapport MB 96-15, Québec, 75 p.
- Buteau, P. 1996b. Inventaire des tourbières de la région des Bois-Francs (31I/08), Ministère des Ressources Naturelles, Rapport MB 96-16, Québec, 45 p.
- Buteau, P. 2000a. Inventaire des tourbières des Basses-Terres du Saint-Laurent (21L/05), Ministère des Ressources Naturelles, Rapport MB 99-30, Québec, 102 p.
- Buteau, P. 2000b. Inventaire des tourbières des Basses-Terres du Saint-Laurent (21L/04), Ministère des Ressources Naturelles, MB 99-20, Québec, 5 p.
- Canards Illimités Canada, 2006. Centre-du-Québec, Plan régional de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes, [en ligne], www.canardsquebec.com, 55 p.
- Chason D.B. et D.I Siegel, 1986. Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, Lost river peatland northern Minnesota, *Soil Sciences*, 142: 91-99.
- Clet, M. et S. Occhietti, 1996. La sous-séquence des sédiments de Saint-Pierre - rythmites du SaintMaurice - Sables des Vieilles-Forges, Pléistocène supérieur, vallée du Saint-Laurent, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50(3) : 287-310.
- Dempster A., P. Ellis, B. Wright, M. Stone et J. Price, 2006. Hydrogeological evaluation of a southern Ontario Kettle-hole peatland and its linkage to a regional aquifer, *Wetlands*, 26(1): 49-56.
- Devito K.J., J.M. Waddington et B.A. Braufireun, 1997. Flow reversals in peatlands influenced by local groundwater systems, *Hydrological Processes*, 11: 103-110.

- Devito K.J., F. Creed, R.L. Rothwell et E.E. Prepas, 2000. Landscape control on phosphorus loading to Boreal Lakes: implications for the potential impacts on harvesting, Canada, Aquatic Sciences, 57: 1977-1984.
- DWAF (Departement of Water Affairs and Forestry), 1997. White paper on a national water policy for South Africa, Republic of South Africa, 64 p.
- Environment Australia, 1994. The council of Australian Governments' Water reform Framework, Sydney, 11 p.
- Fernandes, S. 2010. Caractérisation des propriétés hydrogéologiques des dépôts meubles sur le bassin de la rivière Bécancour, Centre-du-Québec, Canada. Mémoire Master 2 Hydrologie, hydrogéologie et sols, Université Paris-sud XI, Faculté d'Orsay. 49 p.
- Ferone J.M. et K.J. Devito, 2004. Shallow groundwater-surface water interactions in pound-peatland complexes along a boreal plains topographic gradient, Journal of Hydrology, 292: 75-95
- Filion, L. 1987. Holocene Development of Parabolic Dunes in the Central St. Lawrence Lowland, Quaternary Research, 28: 196-209.
- Fournier, V., 2008. Hydrologie de la tourbière du mont Covey Hill et implications pour la conservation, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, 95 p.
- Freeze A.R. et J.A. Cherry, 1979. Groundwater, Prentice-Hall, Englewood cliffs, USA, 356 p.
- Gadd, N.R., 1955. Pleistocene Geology of the Becancour Map-area, Quebec. Ph.D. Thesis, University of Illinois, 191 p.
- Gadd, N.R., 1960. Géologie de la région de Bécancour (dépôts meubles) 31/I8, Commission géologique du Canada, Ottawa, volume 59, numéro 8, 33p.
- Glaser P., G. Wheeler, E. Gorham et H. Wright, 1981. The patterned mires of the Red Lake peatland, northern Minnesota, water chemistry and landforms, Journal of Ecology, 69: 575-599.
- Globensky, Y, 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Québec, cartes, 63p
- Godbout, P.M., M. Lamothe, V. Horoi et O. Caron, 2011. Synthèse stratigraphique et cartographique des dépôts quaternaires et modèle hydrostratigraphique régional, secteur de Bécancour, Québec : Rapport final. Université du Québec à Montréal, à l'intention du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Montréal, 37 p. + 1 carte.

- Hemond H.F., 1980. Biogeochemistry of Thoreau's bog, Concord, Massachusetts, *Ecological Monographs*, 50: 507-526
- Hoag R.S. et J.S. Price, 1995. A field-scale, natural gradient solute transport experiment in peat at a Newfoundland blanket bog, *Journal of Hydrology*, 172: 171-184
- Ingram H.A.P., 1982. Size and shape in raised mires ecosystems, a geophysical model, *Nature* 297: 300-303.
- Ingram H.A.P. et A.J.P. Gore, 1983, *Ecosystems of the world, mires: swamp, bog fen and moor*, Elsevier, Amsterdam, pp. 67-158.
- Ivanov K.E., 1981. *Water movement in mirelands*, Academic Press, New York, 252 p.
- Julien Caron, R., 2009. Analyse des impacts de la production de canneberge au Centre-du-Québec en fonction des objectifs de développement durable, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 92 p.
- Lamothe, M., 1989. A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the central St-Lawrence lowlands, Southern Quebec, *Géographie physique et du Quaternaire*, 43(2): 119-129.
- MDDEP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs), 2012. Système d'information hydrogéologique, [en ligne], <http://www.sih.mddep.gouv.qc.ca/index.html>
- MRNF (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune), 2007. Démarches vers une gestion intégrée des ressources en milieu agricole, Québec, 73 p.
- Morin P. et F. Boulanger, 2005. Portrait de l'environnement du bassin versant de la rivière Bécancour, rapport produit par Enviro-Action pour le groupe de concertation du bassin de la rivière Bécancour (GROBEC), Plessisville, 184 p.
- Muller S., P. Richard et A.C. Larouchelle, 2003. Holocene development of a peatland (southern Québec): a spatio-temporal reconstitution based on pachymetry, sedimentology, microfossils and macrofossils, *The Holocene*, 13(5): 649-664.
- O'Brien A., 1988. Evaluating the cumulative effects of alteration on New England wetlands, *Environmental Management*, 12: 627-636.
- Occhietti, S., P.J.H. Richard, 2003. Effet réservoir sur les âges ^{14}C de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène: révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional, *Géographie physique et Quaternaire*, 57(2-3): 115-138.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 -

- Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306.
- Ouimet, S. et M. Lamothe, Origin, age and development of the Early Holocene Lake Lampsilis, St-Lawrence Lowland, Québec, Conférence AIH-CNC, Québec, 28-31 août 2011, 5 p.
- Ours D., D.I. Siegel et P.H. Glaser, 1997. Chemical dilation and the dual porosity of humified bog peat, *Journal of Hydrology*, 196: 348-360.
- Payette S. et L. Rochefort, 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 621 p.
- Peck R.B, H.O. Ireland et T.S. Fry, 1951. *Studies of solid soil Characteristics, the Earth flow of St-Thurbite*, Quebec, University of Illinois, Departement of civil engineering, Soil mechanic, Series No 1.
- Pharand, M.-C., 2006. *Délimitation des écoulements souterrains sur le bassin versant de la Rivière Noire à l'aide de la caractérisation hydrogéologique, de la géochimie et de la modélisation*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, 125 p.
- Poirier, C. 2012. *Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 Version préliminaire*. Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, Division Hydrologie et Hydraulique.
- Poulin, M., L. Rochefort, S. Pellerin et J. Thibault, 2004. Threats and protection for peatlands in eastern Canada. *Géocarrefour*, 79 : 331-344.
- Reeve A.S., D.I. Siegel et P.H. Glaser, 1999. Simulating vertical flow in large peatland, *Journal of Hydrology*, 227: 207-217.
- Ravonjiarivelo, R. 2011, *Simulation des interactions aquifère-tourbières dans deux régions du Québec (Abitibi et Centre-du-Québec)*, Conférence AIH-CNC, Québec, 28-31 août 2011, 6 p.
- Rochefort, L., A. Bazoge, M. Garneau, M. Joly, S. Jutras, S. Pellerin, M. Poulin, F. Poisson, 2011. *Peatland inventories and conservation in Québec ; The Canadian Workshop Towards sustainable peatland management in Canada*, International Symposium on Responsible Peatland Management and Growing Media Production, Québec, Québec, 29 p.
- Romanowicz E., D.I. Siegel et P.H. Glaser, 1994, Hydraulic reversals and episodic methane emissions during drought cycles in mires, *Geology*, 21: 231-234.

- Rosa E. et M. Larocque, 2008. Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland (southern Quebec, Canada), *Hydrological Processes*, 22: 1866-1875.
- Rosa E., M. Larocque, S. Pellerin, S. Gagné et S. Fournier, 2009. Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34:377-383.
- Rosenberry D.O et J.W. LaBaugh, 2008. Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water, U.S. Department of the Interior, United States of America, Chapter 2, 39 p.
- Shedlock R.J., D.A. Wilcox, T.A. Thompson et D.A. Cohen, 1993. Interactions between groundwater and wetlands, southern shore of Lake Michigan, USA, *Journal of Hydrology*, 141: 127-155.
- Siegel D.I., 1983. Groundwater and the evolution of patterned mires, Glacial Lake Agassiz Peatlands, Minnesota, *Journal of Ecology*, 71: 913-921
- Siegel D.I et P. Glaser, 1987. Groundwater flow in a bog-fen complex, Lost river peatland, Northern Manitoba, *Journal of Ecology*, 75: 743-754.
- Siegel D.I., A.S. Reeves, P.H. Glaser, E. Romanowicz, 1995. Climate-driven flushing of pore water in peatland, *Nature*, 374: 531-533.
- SIH, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, [en ligne], <http://www.sih.mddep.gouv.qc.ca/index.html>, page consultée le 10 septembre 2010
- Slater LD, Reeve A. 2002. Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics, *Geophysics* 67: 365-37
- St-Julien P. et C. Hubert, 1975. Evolution of the Taconian orogeny in the Quebec Appalachians, *American Journal of Science*, 275: 337-362.
- Todd A.K., J.M. Buttle et C.H. Taylor, 2006. Hydrologic dynamics and linkages in a peatland dominated basin, *Journal of Hydrology*, 319: 15-35.
- Toth J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basin, *Journal of Geophysics*, 68: 4795-4812.
- Tremblay A. et N. Pinet, 1975. Distribution and characteristics of Taconian and Acadian deformation, southern Québec Appalachian, *Geological Society of America Bulletin*, 106: 1172-1181.
- Tremblay, A. 1995, Geology of the Appalachians- Caledonian orogen in Canada and Greenland, *Geology of Canada*, vol 6, chap 3, pp 179-197

- Union Européenne, 2000. Cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, Journal officiel de communautés européennes, 327 :1 Disponible en ligne : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:327:0001:0072:FR:PDF>
- Van der Kamp, G. et M. Hayashi, 2009. Groundwater-wetland ecosystem interaction in the semi-arid glaciated plains of North America, *Hydrogeology Journal*, 17: 203-214.
- Whittington P.N. et J. Price, 2006. The effects of water table draw-down (as a surrogate for climate change) on the hydrology of a fen peatland, Canada, *Hydrological Processes*, 20: 3589-3600.